

## УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА ОНДУЛЯТОРНОГО СИНХРОТРОНА

Р. Г. ЗИЯКАЕВ

(Представлена семинаром лаборатории высоких энергий НИИ ЯФЭА)

В работе [1] предложен способ ускорения пучка электронов, удовлетворяющий жестким требованиям к энергетическому разбросу и геометрическим характеристикам в пучке. Такие требования обычно предъявляются к инжекторам ускорителей на большие энергии. Принципиальная схема предложенного ускорителя — ондуляторного синхротрона — показана на рис. 1. Ускорение электронов происходит высокочастотным полем резонатора 2, в котором возбуждаются стоячие волны типа  $H_{10n}$ . Электроны, вылетающие из инжектора (1), попадают в резонатор в максимуме стоячей волны электрического поля, получают энергию  $eU\cos\varphi$  и после выхода из резонатора движутся в поле поворотных

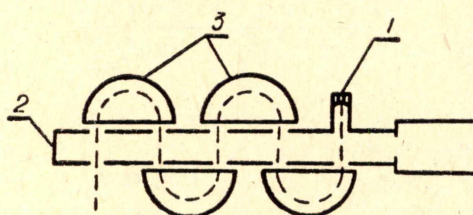


Рис. 1. Принципиальная схема ондуляторного ускорителя. 1 — инжектор, 2 — ускоряющий резонатор, 3 — поворотные магниты.

магнитов (3). Напряженность магнитного поля выбирается так, чтобы электрон, получивший в резонаторе энергию  $eU\cos\varphi$ , после поворота на угол  $\pi$  вошел в резонатор в максимуме электрического поля и снова получил бы энергию  $eU\cos\varphi$ . Расчеты, приведенные в работе [1], показывают, что параметры пучка ондуляторного синхротрона не хуже, чем параметры пучка микротрона, однако ондуляторный синхротрон

имеет большую область захвата электронов в ускорение, что позволит получить большие ускоренные токи электронов. Сочетание большой интенсивности и жестких характеристик пучка делает этот ускоритель перспективным при использовании в качестве инжектора электронов в ускорителе на большие энергии, интенсивность которых значительно зависит от интенсивности и параметров инжектируемого в ускоритель пучка.

### 1. Исследование ускоряющего резонатора с емкостными штырями

Условие синхронизма между временем движения пучка вне резонатора и периодом СВЧ колебаний может быть удовлетворено или изменением расстояния между магнитами, или изменением радиуса поворо-

та электронов в магнитном поле. В первом случае ускоряющий резонатор может быть выполнен с постоянными вдоль длины резонатора размерами, во втором случае необходимо менять расстояние между пролетными отверстиями в резонаторе. Это может быть осуществлено или изменением длины волны вдоль резонатора, или же введением емкостных штырей в местах максимума электрического поля. При этом изменением расстояния между штырями вдоль длины волновода можно добиться требуемого синхронизма, а изменением поперечного расстояния между штырями сохранить постоянство длины волны вдоль ускоряющего резонатора.

Для определения параметров ускоряющей системы в виде волновода с емкостными штырями был изготовлен резонатор с пятью ускоряющими промежутками, расположенными на разных расстояниях друг от друга. Глубину погружения штырей можно было изменять, настраивая таким образом ускоряющую систему на одну частоту. Резонатор такого типа можно рассчитать как систему отдельных резонаторов-ячеек, имеющих различные геометрические размеры и настроенных на одну частоту. Метод расчета отдельной ячейки-резонатора основан на том, что она рассматривается как соединение сосредоточенной емкости и «радиальной линии» [2]. На изготовленном резонаторе были проведены измерения относительного распределения поля вдоль длины резонатора, частоты и шунтового сопротивления. Из-за небольшого увеличения шунтового сопротивления по сравнению с резонатором на основе гладкого волновода (так как требуемая глубина погружения штырей менялась от 2 до 6 мм) и из-за сложности изготовления, настройки и работы с такой системой предпочтение было отдано резонатору на основе гладкого волновода (призматическому резонатору).

## 2. Расчет параметров призматического резонатора

В конструктивном отношении наиболее проста ускоряющая система в виде призматического резонатора, возбуждаемого на волне  $H_{10n}$ . Обладая меньшим по сравнению с резонатором со штырями шунтовым сопротивлением, данный резонатор позволяет получить необходимый прирост энергии на одно прохождение при незначительном увеличении мощности генератора СВЧ. Рассмотрим характеристики призматического резонатора, необходимые для расчета ондуляторного синхротрона.

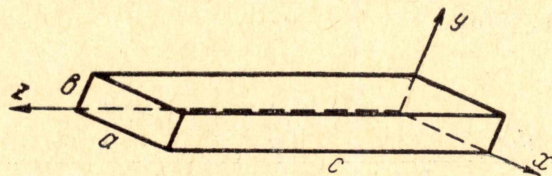


Рис. 2. Ускоряющий резонатор. Ускорение электронов производится в направлении оси  $y$ .

### а. Мощность потерь в стенках призматического резонатора

Расчет мощности потерь в стенках прямоугольного резонатора, возбуждаемого на волне  $H_{101}$ , приведен в работе [3]. Для резонатора, возбуждаемого на волне  $H_{10n}$ , размеры которого показаны на рис. 2, аналогично можно вычислить мощность

$$P = \frac{R_s \lambda^2 E^2}{8 \eta_1^2} \left[ \frac{b \cdot c}{a^2} + n^2 \left( \frac{a \cdot b}{c^2} + \frac{a}{2c} \right) + \frac{c}{2a} \right], \quad (1)$$

где  $\lambda$  — резонансная длина генератора,

$R_s$  — удельное поверхностное сопротивление стенок резонатора с учетом скин-эффекта;

$E$  — напряженность электрического поля в резонаторе.

График зависимости мощности потерь от размеров резонатора для различных напряженностей электрического поля приведен на рис. 3. Вычисления проводились для резонатора, изготовленного из меди, при этом постоянные коэффициенты уравнения (1) выбирались равными

$R = 12 \cdot 10^{-2}$  ом,  $\eta_1 = 377$  ом,  $a = 7,2$  см. Размеры  $c$  и  $b$  резонатора связаны с резонансной длиной волны  $\lambda$  соотношением

$$\lambda = 2 / \text{sqrt} \left[ \left( \frac{1}{a} \right)^2 + \left( \frac{n}{c} \right)^2 \right].$$

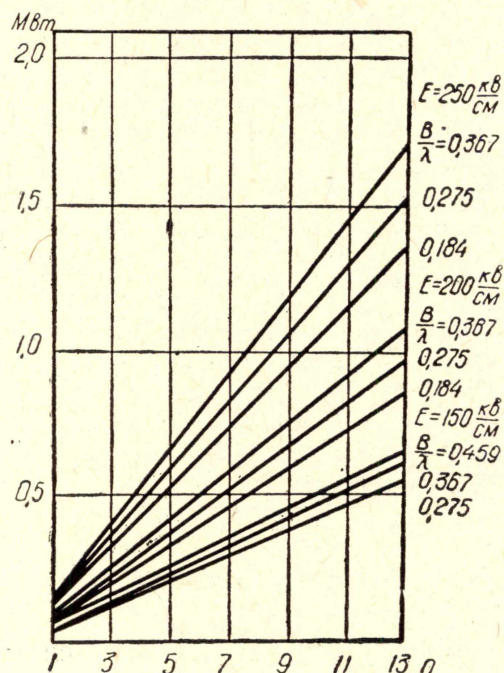


Рис. 3. Мощность потерь в стенках резонатора в зависимости от его размеров и напряженности поля ( $a = 7,2$  см,  $R = 1,2 \cdot 10^{-2}$  ом,  $\tau = 377$  ом).

Мощность потерь, вычисленная по уравнению (1), не совпадает с истинной ее величиной, так как при конструктивном исполнении резонатора вводятся дополнительные потери за счет несовершенства контактов и излучения энергии через отверстия, имеющиеся в резонаторе. Реальное значение мощности потерь можно оценить следующим образом. По определению добротность резонатора  $\Theta$  равна

$$\Theta = 2 \pi W / P, \quad (2)$$

где  $W$  — общая накопленная энергия,

$P$  — энергия потерь за период.

Для призматического резонатора величина добротности, рассчитанная по формуле (2), равна

$$\Theta = \frac{\lambda}{\delta} \cdot \frac{abc}{2} \cdot \frac{\left[ \left( \frac{1}{a} \right)^2 + \left( \frac{n}{c} \right)^2 \right]^{3/2}}{\left( \frac{1}{a} \right)^2 \cdot c(a+2b) + \left( \frac{n}{c} \right)^2 \cdot a(c+2b)}. \quad (3)$$

Ненагруженная добротность изготовленного резонатора  $\Theta_u$ , полученная при измерениях, может быть записана в виде

$$\Theta_u = 2 \pi W_u / P_u.$$

Составим отношение

$$k = \Theta / \Theta_u = (W / W_u) \cdot (P / P_u).$$

Так как величина  $W/W_u > 1$  и  $P/P_u > 1$ , то пессимистичную оценку для мощности потерь реального резонатора можно записать в виде

$$P^* = k \cdot P. \quad (4)$$

Призматические резонаторы, изготовленные нами, обычно имеют  $k = 1,5 \div 1,6$ . Цилиндрические резонаторы, используемые в микротроне, технология изготовления которых разработана более тщательно, имеют  $k = 1,3 \div 1,4$ . Пользуясь формулами (1), (4) и считая мощность, требуемую для ускорения пучка, в виде

$$P_{\text{уск}} = N \cdot I \cdot \Delta U,$$

где  $N$  — число проходов пучком резонатора,

$I$  — ток в пучке,

$\Delta U$  — прирост энергии электронов за одно прохождение резонатора, можно легко оценить мощность СВЧ генератора, требуемую для ондуляторного синхротрона с заданными параметрами.

Так, для получения ускоренного тока  $0,5 \text{ а}$  в импульсе с энергией  $10 \text{ Мэв}$ , используя резонатор с поперечными размерами  $40 \times 72 \text{ мм}$  при  $N = 13$ , достаточно иметь генератор, дающий выходную мощность  $10 \text{ Мвт}$ .

б. Выбор ширины ускоряющего резонатора.

В работе [1] показано, что бетатронные колебания в ондуляторном синхротроне устойчивы, если выполнено условие

$$|\cos \mu| < 1, \\ \cos \mu = -\cos \chi \pi + \frac{\chi L}{2R} \sin \chi \pi,$$

где  $\chi = \sqrt{1-n}$  для радиальных и  $\chi = \sqrt{n}$  для вертикальных колебаний. Данное условие накладывает ограничения на величину допустимых значений  $L/R$ , однако расчеты, проведенные матричным методом, показывают, что величина  $L/R$ , выбранная из условия получения максимального прироста энергии на одно прохождение, допускает устойчивые бетатронные колебания. Рассмотрим, как влияет ширина резонатора на прирост энергии электронов за одно прохождение. Обычная запись прироста энергии в виде  $\Delta T = eU \cos \varphi_s$  в данном случае нецелесообразна, так как время движения электронов в резонаторе близко к  $\pi$ , поэтому удобнее записать силу, действующую на электрон в резонаторе, в виде  $F = eE_0 \sin \omega t$ , так как при записи в виде  $F = eE_0 \cos \omega t$  приходится оперировать или с большими положительными, или с отрицательными фазами. Для оценки прироста энергии достаточно рассмотреть движение электрона только в электрическом поле резонатора, уравнение движения при этом записывается в виде

$$\frac{d}{dt} m \dot{y} = e E_0 \sin \omega t.$$

Решение этого уравнения в релятивистском случае позволяет получить выражение для прироста энергии электрона при прохождении резонатора

$$\Delta T = \frac{eU}{\pi} \cdot \frac{\lambda}{b} \sin \pi \cdot \frac{b}{\lambda} \sin \left( \varphi_0 + \pi \frac{b}{\lambda} \right), \quad (5)$$

где  $U$  — «напряжение» между стенками резонатора,

$\lambda$  — длина волны генератора,

$\varphi_0 = \omega t_0$  — фаза влета электрона в резонатор.

Так как изменение размеров резонатора приводит к изменению мощности потерь в стенках, определим  $U = E \cdot b$  из уравнения (1) и подставим в уравнение (5). При этом выражение (5) запишется в виде

$$\Delta T = \frac{e \eta}{\pi} \sqrt{\frac{8P}{R \left[ b \left( \frac{c}{a^2} + \frac{n^2 \cdot a}{c^2} + \frac{1}{2} \left( \frac{n^2 a}{c} + \frac{c}{a} \right) \right) \right]}} \sin \pi \frac{b}{\lambda} \sin \left( \varphi_0 + \pi \frac{b}{\lambda} \right) \quad (6)$$

Семейство характеристик для  $\Delta T$  в зависимости от фазы влета электронов в резонатор для разных значений отношения  $b/\lambda$  ширины резонатора к длине волны приведено на рис. 4.

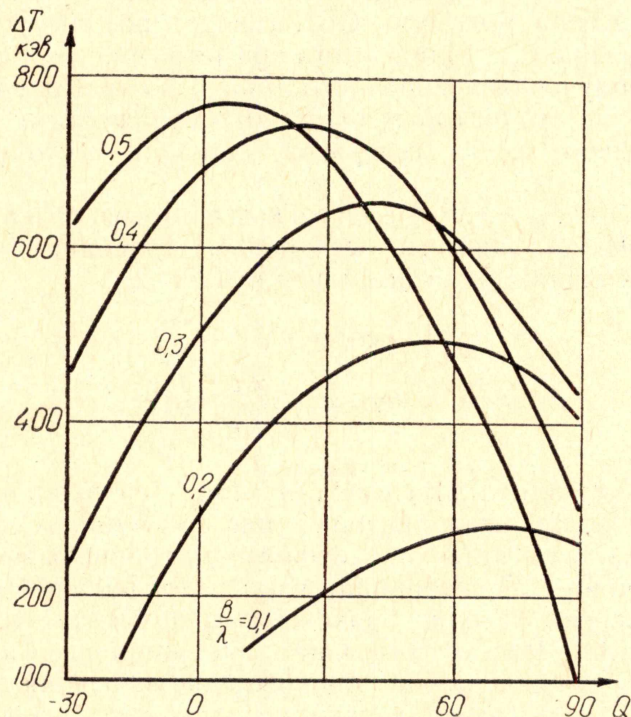


Рис. 4. Зависимость прироста энергии в ускоряющем промежутке от входной фазы и относительной ширины резонатора ( $n=5$ ,  $P=0,6$  Мвт,  $a=7,2$ ).

При расчетах принималось  $P=0,6$  Мвт,  $n=5$ ,  $a=7,2$  см, остальные константы те же, что и в уравнении (1). Из рис. 4 следует:

1. Увеличение ширины резонатора до значений  $b/\lambda=0,5$  приводит к увеличению прироста энергии электронов, несмотря на увеличение мощности потерь в стенках резонатора.

2. В зависимости от отношения  $b/\lambda$  можно предварительно выбрать фазу влета равновесного электрона и оценить область фазовой устойчивости ускорителя. Чтобы фазовые колебания электронов были устойчивы, для магнитной системы с коэффициентом пространственного уплотнения орбит  $k>0$ , которую предполагается использовать в данном ускорителе, фаза влета равновесного электрона должна выбираться на спадающем участке характеристики, расположенном справа от максимального значения  $\Delta T$ . Из рис. 4 видно, что фаза влета равновесного

электрона должна меняться в зависимости от  $b/\lambda$  и при уменьшении  $b/\lambda$  должна возрастать.

3. Как и обычно, область фазовой устойчивости зависит от выбора равновесной фазы. При увеличении фазы влета равновесного электрона область фазовой устойчивости увеличивается, однако при этом магнитная система ускорителя должна обеспечивать прохождение электронов с большими значениями  $\Delta T/T$ . Если магнитная система обеспечивает прохождение электронов с  $\Delta T/T=0,1$ , то максимальная область допустимых значений входных фаз практически не зависит от отношения  $b/\lambda$  и приблизительно равна  $62^\circ$ .

4. Выбор  $b/\lambda > 0,4$  нецелесообразен, так как при этом в области захвата лежат частицы, инжектируемые в тормозящем поле, а это требует создания инжектора к ондуляторному синхротрону на большие энергии.

в. О возможности возникновения высокочастотного разряда (РВР).

Механизм РВР состоит в следующем [4]. Электроны, эмиттированные по какой-либо причине из одного электрода, ускоряясь электрическим полем, ударяются о противоположный электрод. Если энергия электронов при ударе достаточна для выбивания вторичных электронов, то образуется новая группа электронов, которая полем противоположного знака в свою очередь ускоряется по направлению к первому электроду и выбивает из него электроны. Если коэффициент вторичной эмиссии больше единицы, то многократное повторение данного процесса приводит к появлению в ускоряющем зазоре большого тока, который нагружает генератор СВЧ и препятствует нормальной работе резонатора. Для медного резонатора коэффициент вторичной эмиссии больше единицы для падающих электронов с энергиями, лежащими в диапазоне от 0,2 до 3 кв, поэтому область существования РВР обычно узка. При низких напряжениях на резонаторе избавиться от РВР можно, если увеличивать крутизну нарастания напряжения на резонаторе, чтобы РВР не успел развиться, а при установившемся напряжении на резонаторе РВР предотвращается выбором ширины резонатора. Области существования РВР для разных напряжений и величин ускоряющего зазора, а также для разных типов РВР приведены в работах [4], [5], [6]. По данным работы [6] можно видеть, что при напряжениях  $\geq 5 \cdot 10^5$  в РВР не возникает, если частота генератора  $f$  и размер  $b$  резонатора связаны соотношением  $f \cdot b \geq 10^4$  мгц см. Для частоты порядка 3000 мгц получим, что ширина резонатора  $b$  должна быть  $b \geq 3$  см.

г. О согласовании резонатора с волноводным трактом.

В работе [7] рассмотрен вопрос о согласовании резонатора микротрона с волноводным трактом. В работе показано, что величина связи резонатора с волноводным трактом должна выбираться в зависимости от величины ускоренного тока. При этом для устойчивой работы ускорителя необходимо выбирать величину связи больше критической, тогда случайное изменение нагрузки резонатора автоматически сопровождается таким изменением вводимой мощности, что процесс ускорения не нарушается. В работе приведены зависимости величины связи от отношения мощности пучка к мощности потерь, полученные экспериментально и теоретически. Так как эквивалентные схемы прямоугольного резонатора микротрона и ускоряющего резонатора ондуляторного синхротрона идентичны, а отличие заключается только в величине мощности потерь в стенках резонатора, можно для определения величины связи воспользоваться кривыми, приведенными в работе [7].

В заключение автор выражает свою признательность за обсуждение работы и высказанные замечания сотрудникам НИИ ЯФ И. П. Чучалину, Ю. Г. Юшкову и Г. П. Фоменко.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. П. Фоменко, Ю. Г. Юшков. ЖТФ, 39, 1959, 1965.
  2. В. Ф. Коваленко. Введение в электротехнику СВЧ. Изд-во «Советское радио», М., 1950.
  3. С. Рамо и Дж. Уинери. Поля и волны в современной радиотехнике. Пер. с англ. Под ред. Ю. Б. Кобзарева. М., ОГИЗ, 1948.
  4. Н. Тамагawa. Electr. I. Japan. 3. 3. 93, (1957).
  5. Б. А. Загер, В. Г. Тишин. ЖТФ. Т. 34. Вып. 2, 1964.
  6. В. Г. Мудролюбов, В. И. Петрушин. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т. 2, М., 1968, стр. 254.
  7. И. М. Матора, Р. В. Харьюзов. ЖТФ. Т. 39. Вып. 11, 1969.
-