

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АН СССР

препринт - 81

М.М.Карлинер, Г.Н.Острейко, И.А.Шехтман

**Автофазировка интенсивного пучка в
накопителях релятивистских частиц**

НОВОСИБИРСК 1966

А Н Н О Т А Ц И Я

Исследованы особенности автофазировки при движении релятивистских частиц в накопительном кольце с учетом напряжения, наведенного сгустками частиц на высокочастотной ускоряющей системе. Найдены ограничения, накладываемые на ток пучка условием существования равновесной фазы. Определена оптимальная настройка резонатора, позволяющая при заданных параметрах в.ч. генератора поддерживать движение максимального числа частиц в накопителе. Определены условия согласования резонатора, нагруженного пучком частиц, с в.ч. генератором.

1. Введение

Для экспериментов на встречных пучках релятивистские частицы должны длительно удерживаться в накопительных кольцах /1,2/. Потери энергии частиц (радиационные и др.) возмещаются высокочастотным ускоряющим полем одного или нескольких резонаторов. При этом частицы группируются в сгустки. Циркулирующие в накопителе сгустки заряженных частиц наводят на ускоряющей системе высокочастотные поля. При больших токах пучка наведенные поля необходимо учитывать при рассмотрении режима автофазировки. Кроме того, поток заряженных частиц нагружает резонатор, вызывая изменение его полного сопротивления со стороны генератора. Для согласования с в.ч. генератором может потребоваться изменение параметров резонансной системы в процессе накопления частиц или по мере уменьшения их числа за счет различных процессов, определяющих время жизни пучка. Изменение нагрузки играет существенную роль для тех накопителей, в которых мощность радиационных потерь энергии частиц заметно превышает мощность, рассеиваемую в стенках резонатора, т.е. для накопителей с высоким коэффициентом полезного действия. Такие же явления могут иметь место и в ускорителях.

В /3/ А.А.Наумов показал, что нагрузка пучком приводит к расстройке резонатора и предложил для компенсации расстраивать резонатор в противоположную сторону.

В дальнейшем взаимодействие пучка с резонатором при тех или иных условиях было рассмотрено рядом авторов /4-10/

Целью настоящей работы является анализ взаимодействия пучка с ускоряющей системой при достаточно общих предположениях о виде её частотной характеристики. Полученные результаты затем применены к конкретному случаю ускоряющей системы с частотными характеристиками параллельного контура. В работе рассмотрены вопросы, касающиеся статического фазового режима: условие существования равновесной фазы, статическая устойчивость, согласование нагруженного пучком резонатора с в.ч. генератором. При рассмотрении не учитывались продольные эффекты объемного заряда.

2. РАВНОВЕСНАЯ ФАЗА ИНТЕНСИВНОГО СГУСТКА ЧАСТИЦ

Накопитель представляет собой кольцевую магнитную дорожку, по которой движутся сгустки релятивистских частиц. Заряд частиц для определенности будем считать положительным. Число сгустков не может превышать кратность радиочастоты Q ; для упрощения положим, что имеется лишь один сгусток.

Кроме того, сделаем следующие предположения:

- а) энергия частиц выше критической;
- б) азимутальный размер ускоряющего зазора мал по сравнению с длиной волны ускоряющего напряжения;
- в) сгусток также имеет азимутальный размер, малый по сравнению с длиной волны ускоряющего напряжения.

Первые два предположения не ограничивают общности задачи и введены для определенности и упрощения вида конечных формул.

Предположение о длине сгустка более существенно, т.к. оно обеспечивает независимость q -й гармоники тока пучка (q - кратность радиочастоты) от амплитуды ускоряющего напряжения. Это предположение справедливо, если имеет место радиационное затухание начальных колебаний - для электронов и позитронов. Продольное сжатие сгустка может происходить также вследствие адиабатического затухания при подъеме энергии частиц в накопителе (за счет увеличения магнитного поля).

Для расчетов в.ч. система с пучком представляется эквивалентной схемой с двумя генераторами тока (рис.1а). На этой схеме в.ч. генератор представлен генератором тока I_r и сопротивлением Z_r . Сопротивление резонатора, отнесенное к ускоряющему промежутку, обозначено через Z_k , а пучок представлен генератором тока I_q , причем I_q - q -я гармоника тока пучка. При коротком сгустке

$$I_q \approx 2I_0 = 2eNf_s$$

I_0 - средний ток пучка, N - число частиц в накопителе, f_s - частота обращения частиц по равновесной орбите.

В стационарном режиме полное напряжение U на ускоряющей системе создается суммой токов генератора I_r и пучка I_q .

$$U = (I_r + I_q)Z, \quad (1)$$

где $Z = \frac{Z_k Z_r}{Z_k + Z_r}$ - полное сопротивление ускоряющей системы (рис.1б).

Величины U , I_r , I_q и Z являются в общем случае комплексными. Полное сопротивление ускоряющей системы Z зависит, очевидно, от частоты; в данном разделе вид этой зависимости не конкретизирован и может быть произвольным.

Фазы всех токов и напряжений удобно отсчитывать относительно тока пучка, тогда амплитуда тока пучка I_q вещественна.

Для напряжения, тока генератора и полного сопротивления можно записать

$$U = U_x + jU_y, \quad (2)$$

$$I_r = I_x + jI_y,$$

$$Z = R + jX,$$

где U_x , U_y , I_x , I_y , R и X соответственно активные и реактивные составляющие этих величин.

Из (1) и (2) найдем составляющие напряжения на ускоряющем зазоре

$$U_x = R(I_x + I_q) - XI_y, \quad (3)$$

$$U_y = X(I_x + I_q) + RI_y.$$

Уравнения (3) могут быть решены относительно составляющих тока генератора

$$I_x = \frac{RU_x + XU_y}{R^2 + X^2} - I_q, \quad (4)$$

$$I_y = \frac{RU_y - XU_x}{R^2 + X^2}$$

Подставляя (4) в тождественное равенство

$$I_x^2 + I_y^2 = |I_r|^2$$

можно получить уравнение, связывающее величины U_x и U_y .

Равновесный фазовый режим определяется тем, что мгновенное значение напряжения на ускоряющей системе в момент пролета ступка должно соответствовать потерям энергии за оборот, т.е.

$$U_x = -U_0 \quad (5)$$

где U_0 - потери энергии за оборот в электронвольтах. Знак минус соответствует передаче энергии из резонатора в пучок.

При таком значении U_x для U_y получаем следующее выражение:

$$U_{y,2} = I_q X \pm \sqrt{|I_r|^2 (R^2 + X^2) - (U_0 + I_q R)^2}, \quad (6)$$

Таким образом, существуют два равновесных фазовых режима при условии, что подкоренное выражение в (6) положительно. Это условие определяет верхнюю границу тока пучка:

$$I_q < \frac{1}{R} (|I_r| \sqrt{R^2 + X^2} - U_0). \quad (7)$$

В следующем разделе будет показано, что лишь один из найденных фазовых режимов является устойчивым, а именно, соответствующий

$$U_{y2} = I_q X - \sqrt{|I_r|^2 (R^2 + X^2) - (U_0 + I_q R)^2}. \quad (8)$$

Если ток пучка превышает предел, определяемый неравенством (7), то равновесный фазовый режим не существует. Физический смысл этого результата легко понять, если переписать неравенство (7) следующим образом: $I_q R + U_0 < |I_r| \sqrt{R^2 + X^2}$.

Величина $I_q R$ равна энергии (в электрон-вольтах), теряемой одной частицей за оборот за счет напряжения, наведенного пучком на резонаторе при выключенном в.ч. генераторе. Левая часть неравенства, следовательно, равна полным потерям энергии за оборот при выключенном возбуждении резонатора. Правая часть неравенства представляет собой напряжение, создаваемое генератором на резонаторе при отсутствии пучка.

Фазовые соотношения между током пучка и напряжением иллюстрируются векторной диаграммой, приведенной на рис.2. На этой диаграмме I_q - ток пучка, $U_q = I_q Z$ - напряжение, наводимое пучком на ускоряющем зазоре, $U_r = I_r Z$ - напряжение, создаваемое на этом зазоре генератором. Проекция полного напряжения $U = U_q + U_r$ на направление I_q должна быть равна $-U_0$. Поэтому конец вектора U должен лежать на прямой BC .

Как видно из рис.2, возможны два положения вектора U_r , удовлетворяющие этому требованию, если длина вектора U_r достаточно велика. При малой длине конец вектора U_r не может лежать на прямой BC ; это означает, что равновесный фазовый режим не существует.

Из векторной диаграммы видно также, что при увеличении тока I_q , а следовательно и вектора U_q , для поддержания равновесия необходимо увеличивать напряжение U_r .

Вернемся вновь к неравенству (7), которое определяет предельный ток пучка I_{qn} :

$$I_{qn} = |I_r| \sqrt{1 + \frac{X^2}{R^2}} - \frac{U_0}{R}. \quad (9)$$

Чтобы увеличить предельный ток пучка, как следует из (9), необходимо увеличивать $|I_r|$ и отношение $\frac{X^2}{R^2}$. Увеличение $\frac{X^2}{R^2}$ достигается расстройкой резонатора. При больших расстройках могут сказываться паразитные резонансы ускоряющей системы, которые существенно уменьшают величину $\frac{X^2}{R^2}$. Это нужно иметь в виду при анализе работы реальной ускоряющей системы.

Соотношения (4) позволяют найти проводимость, вносимую пучком. Полная проводимость ускоряющей системы, отнесенная к зазору, равна

$$Y_{\text{экр}} = \frac{I_r}{U} = \frac{I_x + jI_y}{U_x + jU_y} \quad (10)$$

подставляя сюда I_x и I_y из (4), получим

$$Y_{\text{экр}} = \frac{1}{Z} + \left(-\frac{I_q U_x}{U_x^2 + U_y^2} + j \frac{I_q U_y}{U_x^2 + U_y^2} \right) = Y + Y_q \quad (11)$$

где Y - проводимость ускоряющей системы без пучка, а Y_q - проводимость, вносимая пучком:

$$Y_q = G_q + jB_q = -\frac{I_q U_x}{U_x^2 + U_y^2} + j \frac{I_q U_y}{U_x^2 + U_y^2} \quad (12)$$

Подставляя сюда U_x и U_y из (5) и (6), можно получить явное выражение для Y_q .

Возможен резонанс, когда реактивные составляющие проводимости пучка и ускоряющей системы взаимно уничтожаются.

Условие резонанса, очевидно, имеет вид:

$$-\frac{X}{R^2 + X^2} = \frac{I_q U_y}{U_x^2 + U_y^2} = 0 \quad (13)$$

Как будет показано в следующем разделе, условия статической устойчивости требуют, чтобы $U_y < 0$. Поэтому для резонанса ускоряющая система должна быть настроена так, чтобы $X < 0$, т.е. ее сопротивление должно иметь ёмкостной характер. Векторная диаграмма на рис.2 изображена именно для такого случая. Отметим, что при энергии частиц ниже критической $U_y > 0$, и для резонанса должно быть $X > 0$.

3. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ РАВНОВЕСНОЙ ФАЗЫ

Статической устойчивостью мы будем называть устойчивость сгустка по отношению к медленным отклонениям от равновесной фазы. При медленных отклонениях можно считать, что наведенное напряжение устанавливается на ускоряющей системе мгновенно, без запаздывания.

Отклонение ϕ фазы в.ч. напряжения (в момент пролета сгустка) от равновесной фазы удовлетворяет следующему дифференциальному уравнению /11/

$$\ddot{\phi} = \frac{q\Gamma\omega_s}{E_s} \left(\frac{dE}{dt} - \frac{dE_s}{dt} \right), \quad (14)$$

где ω_s - угловая частота обращения частиц по равновесной орбите, E_s и E - соответственно энергии частиц на равновесной и неравновесной орбитах, $\Gamma = \frac{1}{\beta^2} \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\gamma^2} \right)$, α - коэффициент пространственного уплотнения орбит.

при энергии выше критической $\Gamma > 0$.

Для накопителя

$$\frac{dE}{dt} - \frac{dE_s}{dt} = \frac{\omega_s e}{2\pi} (U_{\text{уск}} - U_{\text{ускс}}), \quad (15)$$

причем $U_{\text{уск}}$ и $U_{\text{ускс}}$ - соответственно напряжение на ускоряющей системе в неравновесной и равновесной фазах ($U_{\text{уск}} = -U_x$). Радиационное или иное затухание фазовых колебаний при исследовании статической устойчивости несущественно.

Разность $U_{\text{уск}} - U_{\text{ускс}}$ может быть найдена как изменение величины $-U_x$ при повороте вектора U_r на малый угол φ от его равновесного положения (U_r' на рис.2):

$$U_{\text{уск}} - U_{\text{ускс}} = \Delta U_x = -\text{Re}[\Delta U], \quad (16)$$

где ΔU - изменение напряжения на резонаторе.

Если положить $I_r = |I_r| e^{j\psi}$ и $\Delta\psi = \varphi$, то

$$\Delta U = Z \Delta I_r \approx Z I_r j \Delta\psi = j Z I_r \varphi. \quad (17)$$

Так как $I_r = I_x + j I_y$, то с помощью (4), (16) и (17) находим:

$$U_{\text{уск}} - U_{\text{ускс}} = \varphi (U_y - X I_q). \quad (18)$$

подставляя (15) и (18) в (14) получим дифференциальное уравнение, описывающее фазовое движение сгустка заряженных частиц с учетом наведенного напряжения

$$\ddot{\varphi} + \Omega_0^2 \left(1 - \frac{I_q X}{U_y}\right) \varphi = 0, \quad (19)$$

где

$$\Omega_0^2 = -\frac{q \Gamma \omega_s^2 e U_y}{2 \pi E_s}. \quad (20)$$

Уметим еще, что уравнение фазового движения отдельной частицы в сгустке будет иметь обычный вид (если не учитывать эффектов объемного заряда)

$$\ddot{\varphi} + \Omega_0^2 \varphi = 0. \quad (21)$$

Условие статической устойчивости фазового режима для отдельной частицы состоит в том, чтобы

$$\Omega_0^2 > 0, \quad (22)$$

откуда следует, что

$$U_y < 0. \quad (23)$$

Дополнительное условие статической устойчивости сгустка в целом выражается неравенством

$$1 - \frac{I_q X}{U_y} > 0, \quad (24)$$

откуда с учетом (23) получаем

$$|U_y| > -I_q X. \quad (25)$$

Если это неравенство не удовлетворяется, то уравнение (19) имеет решение в виде нарастающей экспоненты, т.е. случайное отклонение от равновесной фазы экспоненциально нарастает.

Рассмотрим теперь вопрос о том, какое из решений (6) для равновесного режима удовлетворяет условию устойчивости (25).

Возможны следующие два случая.

1. $X > 0$. Тогда неравенство (25) удовлетворяется для обоих решений. Условию (23) удовлетворяет лишь U_{y2} , если

$$I_q < \frac{U_0 R}{X^2 + R^2} \left(\sqrt{1 + \frac{|I_r|^2 (X^2 + R^2)}{U_0^2 R^2}} - 1 \right). \quad (26)$$

2. $X < 0$. В этом случае, как легко видеть, U_{y1} не может одновременно удовлетворять условиям (23) и (25). Решение U_{y2} удовлетворяет обоим условиям при токе I_q ,

меньше величины I_{qn} , определяемой равенством (9).

Если $X=0$, то по-прежнему условиям устойчивости удовлетворяет U_{y2} , но этот случай невыгоден, т.к. тогда мала величина I_{qn} .

Можно показать, что ток, определяемый неравенством (26), меньше тока, определяемого неравенством (7). Поэтому выгодно настраивать ускоряющую систему так, чтобы $X < 0$. Такая настройка выгодна еще и потому, что при $X < 0$ возможен резонанс ускоряющей системы с пучком, как это следует из условия резонанса (13).

Итак, из анализа устойчивости следует, что в случае существования равновесного фазового режима при $X < 0$ один из двух возможных режимов устойчив.

Для частиц с энергией ниже критической могут быть получены аналогичные результаты.

Отличие состоит в том, что $\Gamma < 0$, поэтому вместо (23) будет

$$U_y > 0. \quad (27)$$

Условие устойчивости (25) тогда заменяется неравенством

$$U_y > I_q X. \quad (28)$$

Этим условиям, как нетрудно показать, удовлетворяет U_{y1} .

4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПУЧКА С ОДИНОЧНЫМ РЕЗОНАТОРОМ

Во многих случаях зависимость полного сопротивления ускоряющей системы от частоты волизи рабочего резонанса может быть приближенно представлена в виде:

$$Z = \frac{R_0}{1 + j\eta}. \quad (29)$$

где $\eta = Qx = Q\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)$, Q - добротность нагруженной генератором ускоряющей системы, ω_0 - угловая резонансная частота, $R_0 = \frac{R_r R_w}{R_r + R_w}$, R_w - шунтовое сопротивление резонатора, R_r - сопротивление в.ч. генератора (чисто активное и не зависящее от частоты).

Найдем для таких систем соотношения, которые позволят определить факторы, ограничивающие ток пучка. Кроме того, представляет интерес выяснить условия, при которых аппроксимация (29) дает правильные результаты.

Из (29) получаем

$$R = \frac{R_0}{1 + \eta^2}, \quad (30)$$

$$X = -\frac{R_0 \eta}{1 + \eta^2}$$

Подставляя R и X в (9), найдем предельный ток пучка

$$I_{qn} = |I_r| \sqrt{1 + \eta^2} - \frac{U_0}{R_0} (1 + \eta^2). \quad (31)$$

Величина предельного тока, как нетрудно видеть, имеет экстремальные значения при следующих расстройках:

$$\eta_1 = \sqrt{\frac{|I_r|^2 R_0^2}{4U_0^2} - 1}, \quad (32)$$

$$\eta_2 = 0.$$

Первый экстремум существует, если $|I_r| R_0 > 2U_0$.

При этом I_{qn} достигает максимума

$$I_{qn \max} = \frac{|I_r|^2 R_0}{4U_0}. \quad (33)$$

Заметим здесь, что если $U_0 \rightarrow 0$ (например, для протонов), то $I_{qp \text{ макс}} \rightarrow \infty$, т.е. при отсутствии потерь энергии при заданном токе генератора $|I_r|$ можно поддерживать в накопителе сколь угодно большой ток пучка. Соответствующая расстройка η_1 также стремится при этом к ∞ .

Расстройке $\eta_2 = 0$ соответствует минимум тока I_{qp} .

Если $|I_r|R_0 < 2U_0$, то расстройке $\eta_2 = 0$ соответствует максимум предельного тока

$$I_{qp \text{ макс}} = |I_r| - \frac{U_0}{R_0}. \quad (34)$$

На рис.3 представлены схематически графики зависимости I_{qp} от расстройки η .

Резонанс системы пучок-резонатор имеет место при расстройке резонатора η_p , которая может быть найдена из условия резонанса (13):

$$\eta_p = -\frac{U_y I_q R_0}{U_x^2 + U_y^2} = -\frac{U_y I_q R_0}{U^2}. \quad (35)$$

Отметим, что режимы, соответствующие токам $I_{qp \text{ макс}}$ и $I'_{qp \text{ макс}}$, являются резонансными. Это легко проверить путем подстановки (32), (33) или (34) в (8), а затем в (35).

В случае $|I_r|R_0 > 2U_0$ при $I_q = I_{qp \text{ макс}}$ величина U_y получается равной

$$U_y = X I_{qp \text{ макс}} = -U_0 \sqrt{\frac{(I_r^2) R_0^2}{4U_0^2} - 1}. \quad (36)$$

Полное напряжение на резонаторе при этом будет

$$U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2} = \frac{|I_r|R_0}{2} > U_0. \quad (37)$$

Это соотношение позволяет найти $|I_r|$, если задано напряжение на резонаторе U :

$$|I_r| = \frac{2U}{R_0}. \quad (38)$$

Подставляя $|I_r|$ в (33), получим $I_{qp \text{ макс}}$:

$$I_{qp \text{ макс}} = \frac{U^2}{U_0 R_0}. \quad (39)$$

Подставляя $I_{qp \text{ макс}}$ в (35), найдем необходимую расстройку

$$\eta_{\text{макс}} = -\frac{U_y}{U_0}. \quad (40)$$

Формулы (38), (39) и (40) полезны в тех случаях, когда задано напряжение на резонаторе.

Если $|I_r|R_0 < 2U_0$, то $I'_{qp \text{ макс}}$ соответствует расстройке $\eta = 0$. Тогда $U_y = X I_q = 0$, а напряжение на резонаторе

$$U = U_0.$$

Такой режим, очевидно, является неприемлемым.

Представляет интерес найти активную составляющую проводимости, вносимую пучком в предельном режиме. Из (12) имеем

$$G_q = -\frac{I_{qp \text{ макс}} U_x}{U_x^2 + U_y^2} = \frac{1}{R_0}. \quad (41)$$

Следовательно, в режиме предельного тока генератор нагружен на нагрузку, сопротивление которой меньше сопротивления ге-

нератора (см.рис.1)

$$R_{ав} = \frac{R_o \cdot R_w}{R_o + R_w} = \frac{R_r}{1 + 2 \frac{R_r}{R_w}}$$

мощность, потребляемая пучком, равна

$$P_{пучка} = \frac{I_{qp \max} U_o}{2} = \frac{U^2}{2R_o} \quad (42)$$

а мощность потерь в резонаторе при этом

$$P_{рез} = \frac{U^2}{2R_w} \quad (43)$$

Отсюда получается коэффициент полезного действия ускоряющей системы в режиме предельного тока

$$\eta = \frac{P_{пучка}}{P_{пучка} + P_{рез}} = \frac{1}{1 + \frac{R_r}{R_w}} \quad (44)$$

В режиме предельного тока ускоряющая система, нагруженная пучком, не согласована с генератором, так как её сопротивление меньше сопротивления генератора.

Согласование имеет место (т.е. $R_{ав} = R_r$), при токе пучка, равном

$$I_{qc} = \frac{R_w - R_r}{R_w + R_r} I_{qp \max} = \frac{R_w - R_r}{R_w \cdot R_r} \frac{U^2}{U_o} \quad (45)$$

Подставляя I_{qc} в (35), получим расстройку при согласовании

$$\eta_c = \frac{U_o}{U} \cdot \frac{R_w - R_r}{R_w + R_r} \quad (46)$$

Коэффициент полезного действия ускоряющей системы при согласовании равен

$$\eta_c = 1 - \frac{R_r}{R_w} \quad (47)$$

До сих пор мы считали величину R_r заданной. Но так как R_r - это сопротивление генератора, пересчитанное к ускоряющему промежутку, то имеется возможность изменять эту величину за счет изменения связи фидера с резонатором. Поэтому в пределах возможной регулировки связи ток пучка в режиме согласования определяется фактически только мощностью генератора, мощностью потерь в резонаторе и мощностью радиационных или других потерь энергии частицами.

Отметим, что для получения больших токов пучка может потребоваться значительная расстройка резонатора, определяемая формулами (40) и (46). При расстройках, в несколько раз превышающих полосу пропускания ненагруженного резонатора, частотная характеристика резонатора может существенно отличаться от (29).

Пример. Пусть задана мощность генератора $P_r = 500$ квт, радиационные потери за оборот $U_o = 500$ кэв, амплитуда напряжения на резонаторе $U = 2,5$ Мв и шунтовое сопротивление резонатора $R_w = 2 \cdot 10^7$ ом.

Тогда мощность, теряемая в резонаторе, будет равна

$$P_{рез} = \frac{U^2}{2R_w} = 156 \text{ квт.}$$

мощность, которую можно использовать для пучка, равна

$$P_{пучка} = 500 - 156 = 344 \text{ квт.}$$

Отсюда ток пучка, который может циркулировать в накопителе

$$I_q = \frac{2P_{пучка}}{U_o} = 1,4 \text{ а,}$$

что соответствует среднему току 0,7 а.

При этом токе пучка генератор будет работать в режиме

согласования, если сопротивление генератора, отнесенное к ускоряющему промежутку, согласно (47), равно

$$R_r = R_{ш}(1 - \eta_c) = 0,6 \cdot 10^7 \text{ ом.}$$

Это условие может быть выполнено путем выбора нужной связи фидера с резонатором.

необходимая расстройка находится с помощью (46):

$$\eta_{ос} = \eta_c \frac{Q_o}{Q} = \eta_c \frac{R_{ш}}{R_o} \cong 12$$

Следовательно, расчёты правильны при условии, что резонатор не имеет паразитных резонансов при расстройке, в 12 раз превышающей половину его полосы пропускания.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе показано, что при большом токе пучка обычное условие существования равновесной фазы для одной частицы (состоящее в том, что амплитуда напряжения на резонаторе должна превышать напряжение, необходимое для компенсации потерь энергии за оборот) может оказаться недостаточным. Предельная величина тока зависит от мощности в.ч.генератора, от настройки резонатора, а также от условий согласования генератора с резонатором.

При определении максимального тока пучка необходимо учитывать паразитные резонансы (даже слабые) ускоряющей системы волизи частоты ускоряющего напряжения. Эти резонансы могут существенно снизить величину максимального тока пучка.

В случае существования равновесного фазового режима при правильной настройке резонатора ($X < 0$) один из возможных режимов всегда устойчив.

Полученные результаты, относящиеся к одному ступку частиц могут быть без особых трудностей распространены на случай большего числа ступков.

Необходимо отметить, что пучок может взаимодействовать не только с ускоряющей системой, возбуждаемой в.ч.генератором, но также и с любым пассивным резонатором, через который проходит пучок. Взаимодействие может осуществляться на гармонике частоты обращения, близкой к резонансной частоте пассивного резонатора. В статическом приближении действие пассивного резонатора сводится к увеличению потерь энергии частиц за оборот. При этом величина потерь энергии

U_o оказывается зависящей от тока пучка. Более подробное рассмотрение этого вопроса выходит за пределы данной статьи.

Авторы выражают искреннюю благодарность А.п.Скринскому за постоянный интерес к работе и полезные обсуждения.

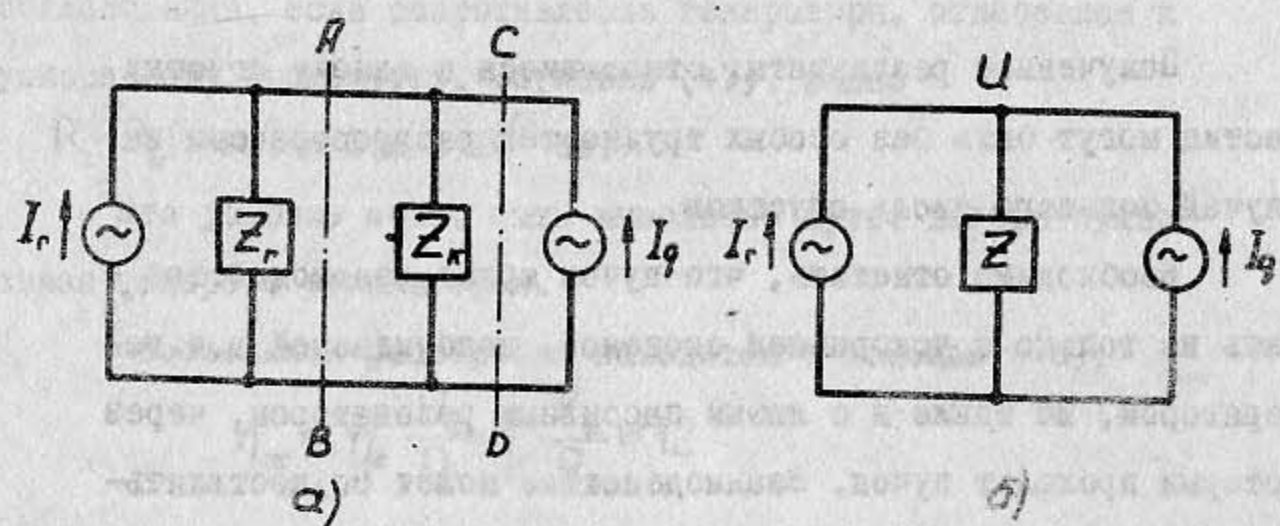


Рис. 1. Эквивалентная схема резонатора с пучком.

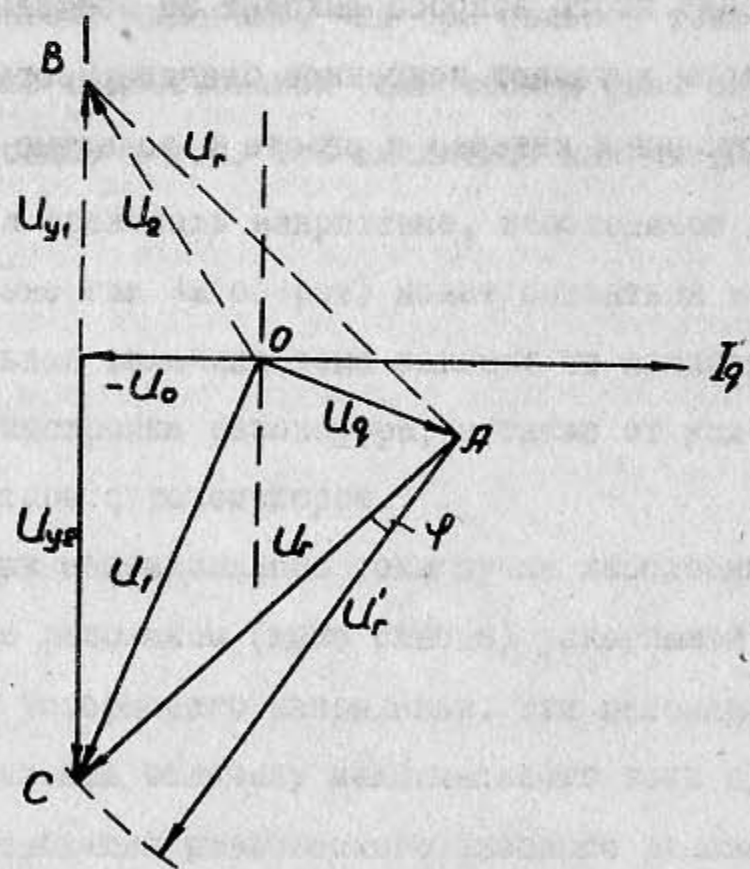


Рис. 2. Векторная диаграмма.

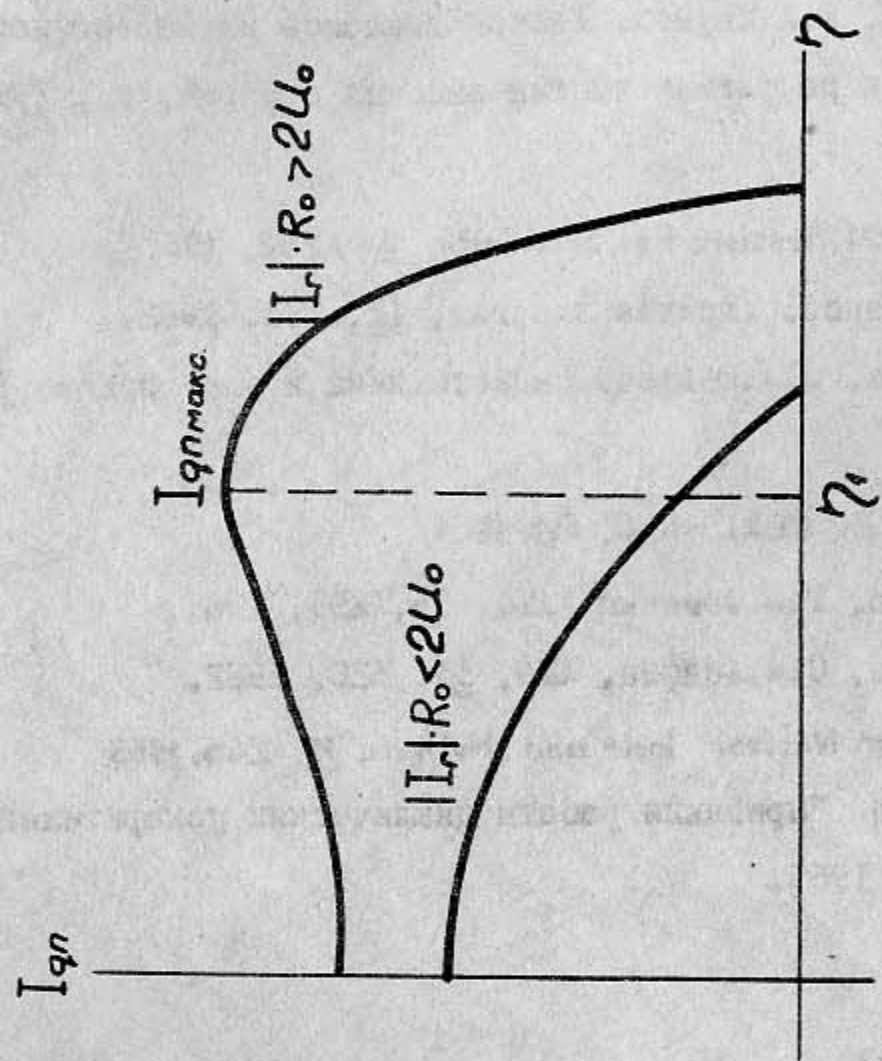


Рис. 3. Зависимость предельного тока пучка от настройки резонатора.

ЛИТЕРАТУРА

- I. "Накопление релятивистских частиц", сб. статей под ред. А.Н.Лебедева, Госатомиздат, М., 1963.
2. Г.И.Будкер и др., "Атомная энергия", 19, 497, 1965.
3. Г.И.Будкер, А.А.Наумов. Тезисы докладов на Всесоюзной конференции по физике частиц высоких энергий, М., 1956, стр.200.
4. V.K. Neil, A.M. Sessler, Rev. Sci. Instr, 32, 256, 1961.
5. С.С.Шахиджанов, Атомная энергия, 12, 483, 1962.
6. А.И.Фарышев, С.А.Хейфец. Радиотехника и электроника, 7, 92, 1962.
7. K.W. Robinson. CEAL-1010, Feв. 1964.
8. А.Н.Диденко, Г.П.Фоменко, АТФ, 35, 293, 1965.
9. А.И.Фарышев, С.А.Хейфец, АТФ, 33, 320, 1962.
10. С.П.М. Turner. Nuclear Instr and Methods, 32, 245, 1965.
- II. Дж.Ливингуд. "Принципы работы циклических ускорителей", М.Л., М., 1963.

Ответственный за выпуск И.Г.Макаров

Отпечатано на ротапринтере в ИЯФ СО АН СССР
Тираж 200 экз. Бесплатно, 0,7 печ.л.
II.10.1966г.