

С345е3

Г-524

+

ГЛАЗОВ, А.А. и
ОНИЩЕНКО, Л.М.

Б1-9-7286

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ



Б1-9-7286

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 19 73

А.А.Глазов, Л.М.Онищенко

Б1-9-7286

УВЕЛИЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАПОЛНЕНИЯ (РАСТЯЖКА
ПУЧКА) СИЛЬНОТОЧНОГО ФАЗОТРОНА О И Я И
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ С-ЭЛЕКТРОДА

с. ф. 37/2

Рукопись поступила
в издательский отдел
~~31.05.1973~~

9 мая 73

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
Лаборатория ядерных проблем
- Дубна, 1973 г. -

Применение для увеличения коэффициента заполнения^{ж)} синхроциклотрона (растяжки пучка) схемы, использующей доускорение пучка в синхроциклотронном режиме с помощью С-электрода, площадь фазовой устойчивости которого равна (или больше) площади, занимаемой на фазовой плоскости частицами пучка, несмотря на трудность реализации, имеет несомненные достоинства. Главным из них является прозрачность физики процесса и вытекающая отсюда высокая надежность расчета. Немаловажным является также то обстоятельство, что этот метод реализован на действующем ускорителе /1/. Наконец, принципиальная возможность достижения стопроцентной эффективности^{жж)} работы системы растяжки, подтвержденная экспериментально, представляет особую ценность для сильноточного ускорителя. Кроме того, как и другие схемы, связанные с доускорением пучка, эта схема может (по выбору) использоваться для растяжки как внутреннего, так и выведенного пучка протонов.

I. Синхроциклотронное доускорение представляет собой первый по времени появления способ растяжки пучка. Его идея состоит в том, чтобы, начиная с некоторого момента цикла ускорения уменьшить набор энергии частицами за оборот (и, соответственно, набор радиуса). При этой новой величине набора энергии частицы набирают оставшуюся часть энергии (радиуса) за время, сравнимое с периодом цикла модуляции. Для достижения указанной цели обычно применяют вспомогательный электрод (С-электрод),

ж) Под коэффициентом заполнения понимается отношение длительности пучка к периоду модуляции синхроциклотрона.

жж) Эффективность системы растяжки — отношение числа частиц в растянутом пучке к числу частиц, ускоренных до радиуса накопления.

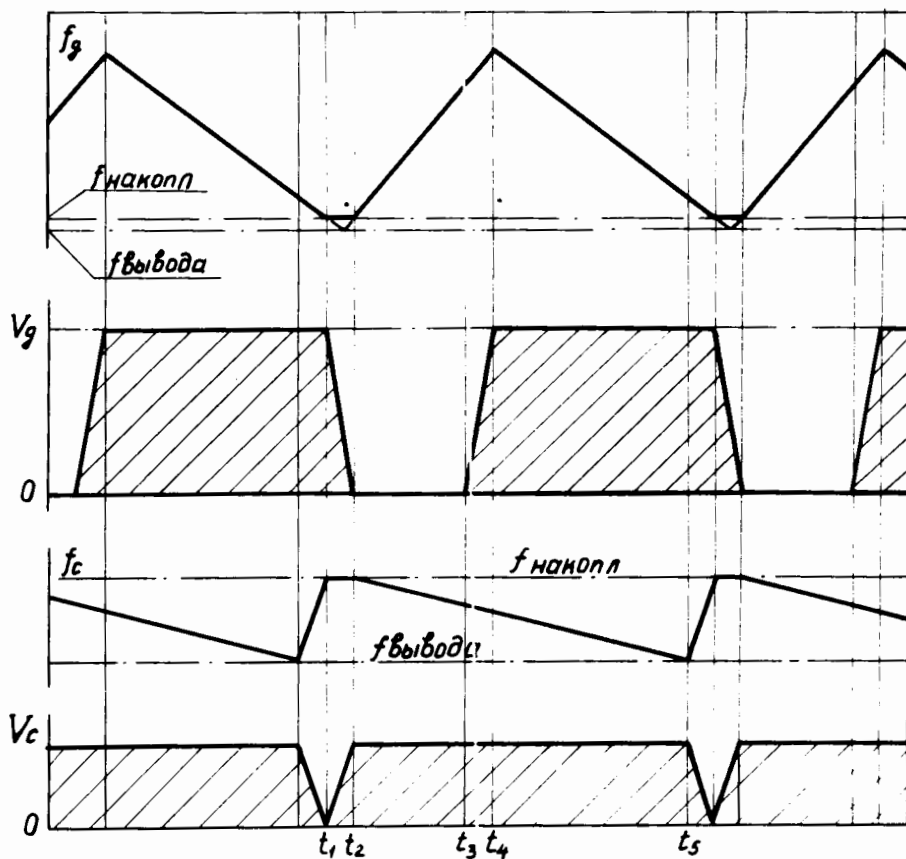
частота и амплитуда напряжения на котором изменяются по определенной программе при помощи отдельного высокочастотного генератора.

На рис. I показаны диаграммы, иллюстрирующие работу синхротрона в режиме растяжки пучка. Пучок частиц ускоряется с помощью дуанта до радиуса накопления R . В момент достижения этого радиуса (соответственно, частоты f накопл.) напряжение дуанта уменьшается и одновременно начинает увеличиваться напряжение С-электрода при постоянной частоте. В момент времени t_2 , когда напряжение дуанта снижается до нуля, напряжение на С-электроде достигает максимума и начинает изменяться его частота. Полное изменение частоты С-электрода от f накопл. до f вывода осуществляется*) за время от t_2 до t_5 , и в течение всего этого времени, немного меньшего периода основного цикла, осуществляется вывод пучка.

После выключения напряжения дуанта его частота f_d начинает изменяться в обратном направлении, подготавливая следующий цикл. В момент t_3 , когда разность ($f_d - f_{\text{накопл}}$) становится достаточной, чтобы исключить влияние дуанта на накопленный пучок, включается напряжение дуанта, и, после достижения им номинальной величины, начинается новый цикл ускорения частиц.

В идеальном случае процедура состоит в перезахвате ускоренных частиц из области устойчивости основного дуанта в область устойчивости С-электрода и их последующем ускорении с помощью С-электрода до радиуса вывода. Достигается это синхронизацией напряжения С-электрода по частоте и по фазе с напряжением дуанта при постепенном (адиабатическом) уменьшении амплитуды напря-

*) Частоты f накопл. и f вывода относятся к частоте обращения частиц с нулевыми амплитудами синхротронных колебаний.



Диаграмма, иллюстрирующая зависимость от времени напряжения и частоты дуанта и С-электрода при работе фазотрона в режиме растяжки пучка.

рис 1

жения на дуанте и одновременном увеличении ее на С-электроде.

2. Фазовый размер области устойчивости определяется условием

$$-\varphi_2 < \varphi < \varphi_2$$

причем φ_2 находится из уравнения*)

$$\sin \varphi_2 + \sin \varphi_2 - (\varphi_2 + \varphi_2) \cos \varphi_2 = 0 \quad (1)$$

а величина φ_2 связана с параметрами ускорителя соотношением

$$eV \cos \varphi_2 = - \frac{2\pi E_s}{K \omega_s^2} \frac{d\omega_s}{dt} \quad (2)$$

где E_s и ω_s - равновесные значения энергии и частоты обращения,

$$K = - \frac{E_s}{\omega_s} \left(\frac{\partial \omega}{\partial E} \right)_s = 1 - \frac{n}{(1+n)\beta^2}, \quad n = \frac{R}{B} \frac{\partial B}{\partial R} \quad (3)$$

ω_s и V - частота и амплитуда ускоряющего напряжения.

Для растяжки пучка необходимо уменьшить набор энергии ($eV \cos \varphi_2$) обеспечиваемый вспомогательным электродом, по сравнению с набором энергии ($eV \cos \varphi_2$)₂ от основного дуанта. Этого можно достичь либо за счет уменьшения eV при постоянном $\cos \varphi_2$, либо за счет уменьшения $\cos \varphi_2$ (увеличения φ_2) при постоянном eV , либо, наконец, за счет одновременного уменьшения eV и $\cos \varphi_2$.

В любом случае фазовый размер области устойчивости, как видно из (1), не уменьшается.

Что касается энергетического размера области устойчивости, который равен (половинный размер)

$$\Delta E_{обл.уст} = 2 \left[\frac{eVE_s (\sin \varphi_2 - \varphi_2 \cos \varphi_2)}{2\pi K} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

*) Здесь принята система обозначений, при которой набор энергии за оборот $eV \cos \varphi_2$ достигает максимума при $\varphi_2 = 0$.

то он увеличивается при увеличении φ_s и уменьшается с уменьшением амплитуды ускоряющего напряжения. Это позволяет, в определенных пределах, уменьшать набор энергии за оборот, сохраняя энергетический размер области устойчивости.

Так, например, если принять для дуанта $eV = 100$ кэв, $\cos \varphi_s = 0.4$ ($\sin \varphi_s = 0.917$; $\varphi_s = 1.160$), а для С-электрода $\cos \varphi_s = 0.05$ ($\sin \varphi_s = 0.999$; $\varphi_s = 1.520$), то для сохранения энергетического размера области устойчивости необходимо $(eV)_c = 49$ кэв. При этом степень растяжки пучка $m = \frac{(eV \cos \varphi_s) g}{(eV \cos \varphi_s) c} = 16.3$ оказывается близкой к желаемой, однако величина напряжения на С-электроде оказывается трудно реализуемой.

Проведенное выше рассмотрение носит статический характер. На самом деле, уменьшение ускоряющего напряжения вызывает не только уменьшение энергетического размера области устойчивости, но также и затухание энергетических колебаний частиц, что позволяет допустить некоторое уменьшение $\Delta E_{обл.уст}$ для С-электрода без потерь частиц, если изменение набора энергии происходит достаточно медленно, чтобы можно было воспользоваться адиабатической теоремой Эренфеста.

Рассмотрение этой проблемы в терминах Гамильтоновского формализма в предположении независимости периода фазовых колебаний от их амплитуды (что достаточно хорошо выполняется до амплитуд, составляющих три четверти от максимально возможной) дает следующую зависимость амплитуды колебаний энергии частиц от параметров ускорителя

$$\Delta E_{max} = Const \left[\frac{eV \sin \varphi_s E_s \omega_s^2}{2\pi R} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

Значение константы в (5) можно определить, считая что в начале ускорения максимальная амплитуда колебаний энергии равна энергетическому размеру области устойчивости. При этом

$$\Delta E_{max} = \left[\frac{eV_0 E_{s0} eV E_s (\sin \varphi_{s0} - \varphi_{s0} \cos \varphi_{s0})^2 \sin \varphi_s \omega_s^2}{(2\pi)^2 \mathcal{K}_0 \mathcal{K} \sin \varphi_{s0} \cos^2 \varphi_{s0}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (6)$$

где индекс "0" относит переменные к началу ускорения. При параметрах установки "Ф" ($eV = eV'_s = 10^5$ эв, $E_s = 1.62 \cdot 10^9$ эв,

$f_s = 14.4$ МГц, $f_{s0} = 18.2$ МГц, $\cos \varphi_s = \cos \varphi_{s0} = 0.4$, $\mathcal{K}_0 = 0.32$, $\mathcal{K} = 0.8$) $\Delta E_{max} = 7.7$ Мэв.

При переходе от ускорения частиц дуантом к ускорению их С-электродом значения величин E_s , ω_s и \mathcal{K} не изменяются; при этом потери частиц будут отсутствовать, если величина (6) будет равна величине (4) (при приравнивании величины с индексом следует отнести к дуанту, а без индекса - к С-электроду). Если предположить, что в процессе ускорения частиц дуантом величины V и $\cos \varphi_s$ остаются постоянными, то необходимая величина $(eV)_c$ определится как

$$\frac{(eV)_c}{(eV)_g} = \frac{(\sin \varphi_s)_c}{(\sin \varphi_s)_g} \left[\frac{(\sin \varphi_s - \varphi_s \cos \varphi_s)_g}{(\sin \varphi_s - \varphi_s \cos \varphi_s)_c} \right]^2 \frac{\mathcal{K} E_{s0} \omega_s^2}{\mathcal{K}_0 E_s \omega_{s0}^2} \quad (7)$$

При тех же значениях $(\varphi_s)_c$, V_g и $(\varphi_s)_g$, а также с учетом того, что в установке "Ф" $\mathcal{K}/\mathcal{K}_0 = 2.6$; $E_s/E_{s0} = 1.73$; $\omega_s/\omega_{s0} = 0.8$ из (7) получим $(eV)_g/(eV)_c = 4.15$ или $eV_c = 24$ Кэв. При этом степень растяжки пучка $m = 33$ еще не слишком велика.

Что касается необходимого диапазона измерения частоты С-электрода, то он зависит от амплитуды радиальных колебаний и равен

$$\frac{\Delta f}{f} = \left[\left(\frac{E_0}{E_s} \right)^2 (1+n) - 1 \right] \frac{\Delta R}{R} \quad (8)$$

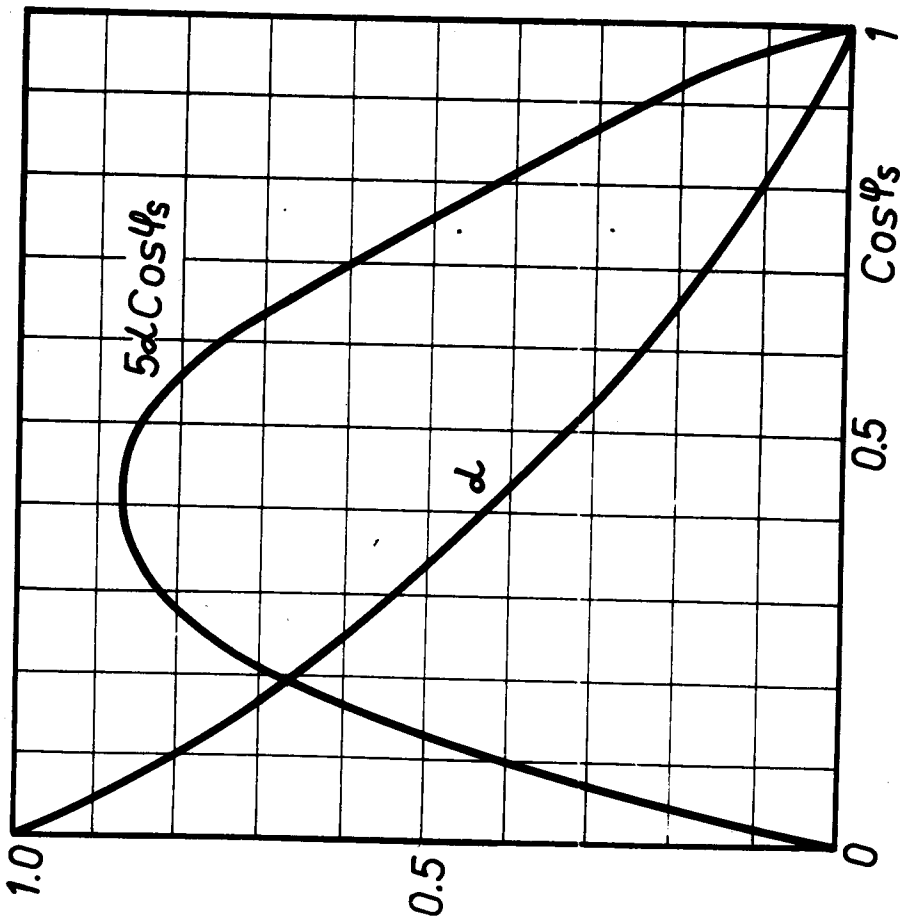
где ΔR - необходимый радиальный сдвиг, равный максимальной амплитуде радиальных колебаний (с учетом бетатронных колебаний). Для установки "Ф" ($f = 14.4$ МГц; $n = 0.15$; $R = 2.75$ м; $\Delta R = 6$ см) необходимая полоса частот оказывается примерно равной 200 КГц.

3. Существенным недостатком описанной выше схемы использования С-электрода для растяжки пучка является трудность ее реализации из-за большой величины необходимого напряжения на С-электроде (требуется перестраиваемый по частоте генератор на значительную - порядка 100 квт - мощность). Требования к необходимой величине напряжения на С-электроде могут быть заметно снижены при использовании его в режиме многократного синхроциклотронного ускорения. Идея состоит в том, чтобы "вычерпать" накопленный пучок с помощью нескольких областей устойчивости, суммарная площадь которых равна площади, занимаемой пучком на фазовой плоскости ($\Delta E, \varphi$), в отличие от предыдущего случая, когда накопленный пучок перехватывался одной областью фазовой устойчивости необходимой площади. Для осуществления такого режима необходимо, чтобы частота С-электрода изменялась несколько раз за время основного цикла (см. рис. I-б).

Площадь области фазовой устойчивости С-электрода

$$S_1 = 16 \left[\frac{e V E_s}{2 \pi k} \right]^{\frac{1}{2}} \alpha(\varphi_s) \quad (8)$$

где $\alpha(\varphi_s) = \frac{1}{8} \int_{-\varphi_s}^{\varphi_s} [2(\sin \varphi_s - \varphi_s \cos \varphi_s + \sin \varphi - \varphi \cos \varphi)]^{\frac{1}{2}} d\varphi \quad (9)$



puc 2

(график этой функции представлен на рис.2), а значения eV , φ_2 и φ_1 относятся к С-электроду, причем φ_1 определяется соотношением (I).

С другой стороны, площадь, занимаемая на фазовой плоскости накопленным пучком с энергетическим разбросом $\pm \Delta E$, может быть записана как*)

$$S = 2\pi \cdot 2\Delta E \quad (10)$$

причем величина ΔE может быть определена из (6). При параметрах установки "Ф" ($eV = 10^5$ эв; $\cos\varphi_2 = 0.4$; $E_2 = 1.62 \cdot 10^9$ эв; $\mathcal{K}_0 = 0.32$; $\mathcal{K} = 0.8$; $\omega_2/\omega_{20} = 0.8$) эта величина равна $\Delta E \approx 7.7$ Мэв. Полагая $S = N S_1$ (N - число областей устойчивости), найдем для значения максимального набора энергии, который должен обеспечить С-электрод

$$eV_c = \frac{1}{32} \frac{\mathcal{K}}{E_2} \left[\frac{2\Delta E}{N\alpha(\varphi_1)} \right]^2 \approx \frac{\mathcal{K}}{E_2} \left[\frac{2\Delta E}{N\alpha(\varphi_1)} \right]^2 \quad (11)$$

Второе условие, накладываемое на величину набора энергии есть обычное синхроциклотронное условие**)

$$eV = \frac{N\Delta f E_2}{T f^2 \mathcal{K} \cos\varphi_2} \quad (12)$$

где T - период модуляции основной программы, а Δf - необходимый диапазон перестройки частоты С-электрода.

*) Предполагается, что после выключения напряжения дуанта пучок расплывается по фазе на длину всей окружности.

***) Здесь величина $d\omega/dt$ определена приблизительно как

$$\frac{N 2\pi \Delta f}{T}$$

Из сравнения (II) и (I2) найдем, что

$$N\alpha = \left[\frac{Tf^2}{\Delta f} \left(\frac{2K\Delta E}{E_s} \right)^2 \alpha C_0 \varphi_s \right]^{\frac{1}{3}} = 1.14 (\Delta E_{\text{мэв}})^{\frac{2}{3}} (\alpha C_0 \varphi_s)^{\frac{1}{3}} \quad (I3) \text{*)}$$

и

$$eV = \left[\frac{E_s}{K} \left(\frac{2\Delta E \Delta f}{Tf^2 \alpha C_0 \varphi_s} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}} = 1.75 \left(\frac{\Delta E_{\text{мэв}}}{\alpha C_0 \varphi_s} \right)^{\frac{2}{3}} \text{ кэВ} \quad (I4) \text{*)}$$

Значение $N\alpha$ достигает максимума, а eV - минимума, когда $\alpha C_0 \varphi_s$ максимально. Это случается (см. рис. 2) при $C_0 \varphi_s = 0.4$; при этом $N\alpha = 0.64 (\Delta E_{\text{мэв}})^{\frac{2}{3}}$ и $eV_{\text{кэВ}} = 5.6 (\Delta E_{\text{мэв}})^{\frac{2}{3}}$. Разброс энергий, как было найдено выше $\Delta E = 7.7$ Мэв; при этом $N\alpha = 2.5$, $N = 5$ и $eV = 22$ кэВ. Столь большая величина eV_c , кажущаяся на первый взгляд неожиданной, объясняется двумя причинами. Во-первых, при определении необходимой величины максимального набора энергии в режиме многократного свипирования мы приравнивали площади областей устойчивости и занятую пучком, а не их энергетические размеры, как в случае однократного свипирования. Во-вторых, в этом случае не была принята в расчет возможность уменьшения энергетического разброса в накопленном пучке за счет адиабатического уменьшения напряжения дуанта в конце цикла ускорения. Как видно из предыдущего, можно уменьшить $(eV)_g$ без потери частиц примерно в 4 раза; при этом энергетический разброс в пучке уменьшится в $\sqrt{2}$ раз и, как видно из (I4), требуемое напряжение С-электрода - в $\sqrt[3]{2}$ раз.

Если при определении (eV_c) приравнивать не площади областей устойчивости, а только их энергетические размеры, то вместо (I3) и (I4) получим

*) Константы здесь определены при следующих проектируемых параметрах установки "Ф": $T = 1.5 \cdot 10^{-3}$ сек, $f = 14$ Мгц, $K = 0.8$; $E_s = 1.62 \cdot 10^9$ эв и $\Delta f = 200$ кгц.

$$N_{\beta} = \left[\frac{2\pi}{16} \frac{Tf^2}{\Delta f} \left(\frac{2\kappa \Delta E}{E_s} \right)^2 \beta \cos \psi_s \right]^{\frac{1}{3}} \approx 0.84 (\Delta E_{\text{МэВ}})^{\frac{2}{3}} (\beta \cos \psi_s)^{\frac{1}{3}} \quad (15) *$$

$$eV = \left[\frac{2\pi}{16} \frac{E_s}{\kappa} \left(\frac{2\Delta E \Delta f}{Tf^2 \beta \cos \psi_s} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}} \approx 1.28 \left(\frac{\Delta E_{\text{МэВ}}}{\beta \cos \psi_s} \right)^{\frac{2}{3}} \text{ кэВ} \quad (16) *$$

где

$$\beta(\psi_s) = (\sin \psi_s - \psi_s \cos \psi_s)^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

Величина N_{β} достигает максимума, а eV - минимума при максимуме $\beta \cos \psi_s$, который достигается при $\text{tg} \psi_s = 1.5 \psi_s$. При этом $N_{\beta} = 0.56 (\Delta E_{\text{МэВ}})^{2/3}$ и $eV_{\text{кэВ}} = 2.8 (\Delta E_{\text{МэВ}})^{2/3}$. Если, как и выше, $\Delta E = 7.7$ МэВ, то $N_{\beta} = 2.18$; $N \approx 4$ и $eV = 11$ кэВ.

Что касается эффективности такого способа растяжки, то вопрос об этом может быть, повидимому, решен только с помощью численных (на ЭВМ) расчетов.

Расчеты, выполненные для С-электрода синхроциклотрона ЦЕРН / 2/, показывают, что эффективность может достигать 75%. В этих расчетах было обнаружено интересное явление, состоящее в том, что частицы ускоряются до конечной энергии с эффективностью около 50% даже в том случае, когда площадь области фазовой устойчивости С-электрода равна нулю ($\cos \psi_s \approx 1$), причем коэффициент заполнения в этом случае оказывается даже выше.

4. С-электрод располагается на радиусе накопления R и представляет собой пролетную трубку, имеющую в плане форму кольцевого сектора. Его вертикальная и радиальная апертуры определяются амплитудами соответственно вертикальных и радиальных колебаний частиц. Что касается его угловой протяженности θ , то

* Константы здесь определены при следующих проектируемых параметрах установки "Ф": $\tau = 1.5 \cdot 10^{-3}$ сек, $f = 14$ МГц, $\kappa = 0.8$; $E_s = 1.62 \cdot 10^9$ эВ и $\Delta f = 200$ кгц.

она обычно определяется конструктивными возможностями, но должна быть не очень малой, т.к. набор энергии при напряжении на электроде V_c равен

$$\Delta E_c = 2eV_c \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \varphi_s \quad (18)$$

При угловой протяженности С-электрода 0.75 рад и необходимой величине набора энергии - 25 кэв, напряжение на нем, как следует из (18), должно составлять около 35 кэв.

С-электрод в камере при частоте 14 Мгц может приближенно рассматриваться как сосредоточенная емкость, величина которой определяется площадью его поверхностей и их расстоянием от проводящих поверхностей камеры.

$$C \approx 2 \frac{\epsilon_0 \Delta R_c R \theta}{H-h} \left[1 + \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{\Delta R_c} + \frac{1}{R \theta} \right) 2h \frac{(2H-h)^{2H-h}}{h^H (H-h)^{2(H-h)}} \right] + C_k \quad (19)$$

где ΔR_c , $R \theta$, $2h$ - радиальный, азимутальный и вертикальный размеры электрода; $2H$ - вертикальный размер камеры; C_k - емкость конструктивных элементов; $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9} \text{ Ф/м}$ - диэлектрическая проницаемость вакуума.

Для установки "Ф" ($2H = 30$ см, $2h = 10$ см, $R \theta = 2,3$ м, $\Delta R_c = 25$ см) оценка емкости по (19) дает 220 пф без учета конструктивной емкости. Так как потребляемая высокочастотная мощность увеличивается с увеличением емкости С-электрода, то должны быть приняты все меры для ее уменьшения (например, уменьшение вертикальной и радиальной апертур) до величины, не превосходящей 200 пф.

Возможны различные схемы питания С-электрода (некоторые из них будут рассмотрены ниже). Общим для всех схем является наличие резонансной линии, которая вместе с емкостью С-электро-

да образует резонансный контур.

5. Простейшая схема представляет собой резонансный контур, образованный емкостью С-электрода и короткозамкнутой коаксиальной линией, причем необходимая полоса частот (в рассматриваемом случае 200 кгц) получается за счет понижения добротности контура без его перестройки. Понижение добротности контура осуществляется за счет шунтирования его активным сопротивлением (рис.3). Для показанного на рис.3 контура резонансное условие имеет вид

$$\operatorname{tg} \beta l = \frac{1}{Z_0 \beta C} \quad (20)$$

где $\beta = 2\pi f/c$, c - скорость света, C - емкость, Z_0 и l - волновое сопротивление и длина резонансной линии.

Добротность такого контура

$$Q = \frac{\beta Z_0}{r_1} \quad (21)$$

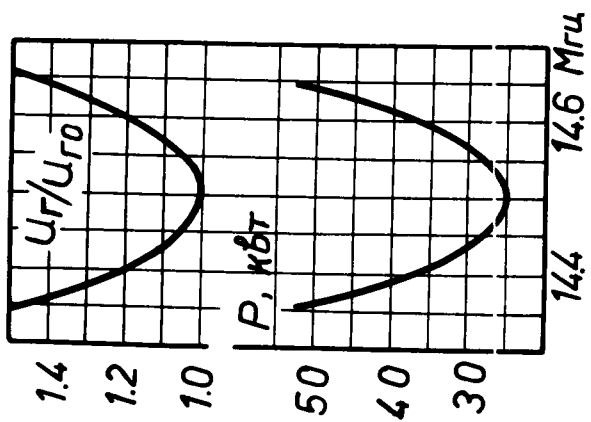
а мощность потерь в нем

$$P_1 = \frac{r_1}{8\beta} \left(\frac{V_c}{Z_0} \right)^2 \frac{2\beta l + \sin 2\beta l}{\sin^2 \beta l} \quad (22)$$

Здесь r_1 - погонное активное сопротивление линии.

Выражение (22) можно использовать также для определения полных потерь в линии, если под r_1 подразумевать эквивалентное сопротивление потерь (с учетом шунтирования). Определяя r_1 из (21), где теперь Q обозначает добротность зашунтированного контура, получим

$$P = \frac{V_c^2}{8QZ_0} \frac{2\beta l + \sin 2\beta l}{\sin^2 \beta l} \quad (23)$$



$C = 240 \text{ пФ}$ $\ell = 2,5 \text{ м}$
 $V_c = 10 \text{ кВ}$

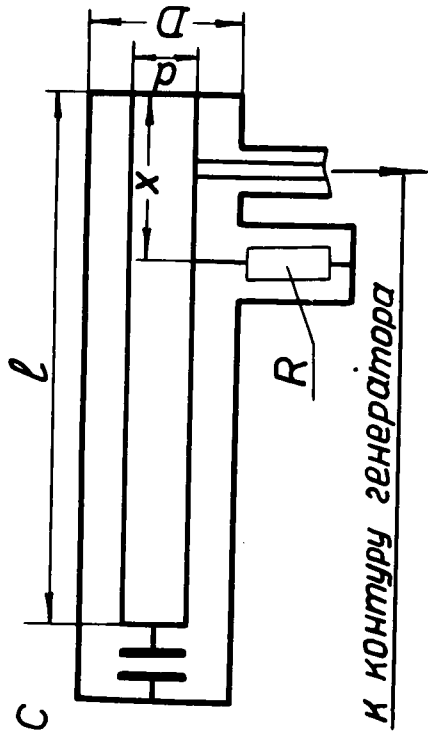


Схема резонансного контура С-электрота, зашунтированного активным сопротивлением R , и зависимости мощности потерь в контуре P и напряжения на генераторе U_{Γ} от частоты.

рис 3

С другой стороны, мощность рассеивания в шунтирующем сопротивлении

$$P = \frac{V_c^2}{2R} \frac{\sin^2 \beta x}{\sin^2 \beta l} \quad (24)$$

Поскольку мощность потерь собственно в линии пренебрежимо мала по сравнению с рассеиваемой в сопротивлении, мы можем, приравняв (23) и (24), найти место подключения шунтирующего сопротивления

$$\sin^2 \beta x = \frac{R}{4QZ_0} (2\beta l + \sin 2\beta l) \quad (25)$$

Величина необходимой добротности $Q = \frac{f}{2\Delta f} = 50$ при $f = 14$ Мгц и $2\Delta f = 280$ кгц. Величина βl , как следует из (20) при $Z_0 = 50$ ом, $\beta = 0.3$ ($f = 14$ мгц) и $C = 240$ пф, равна $\beta l = 0.75$. Тогда при $V_c = 35$ кв необходимая величина высокочастотной мощности составляет около 300 квт, а точка подключения нагрузки при $R = 50$ ом $x = 0.34$ м. На рис.3 показан характер изменения потребляемой мощности и амплитуды питающего напряжения в зависимости от частоты для поддержания постоянного значения $V_c = 10$ кв. Видно, что на границе полосы пропускания необходимая высокочастотная мощность возрастает вдвое. Для поддержания постоянного значения V_c необходима модуляция выходного напряжения генератора примерно на 40%.

Приведенные оценки показывают, что применение этой простейшей схемы для питания С-электрода возможно только в том случае, если требуемая амплитуда напряжения на С-электроде не превышает 10 кв.

6. Другая возможная схема питания С-электрода, использующая перестраиваемый по частоте резонансный контур, показана на рис.4. Перестройка частоты осуществляется с помощью подмагничиваемого феррита, частично заполняющего короткозамкнутую коаксиальную линию. В этом случае высокочастотная мощность подводится от генератора согласованным фидером. Предполагается, что контур окончного каскада генератора аналогичен контуру С-электрода (и также перестраивается с помощью феррита), а предыдущие каскады представляют собой широкополосное устройство.

Частота обоих перестраиваемых контуров изменяется во времени по закону, лишь приближенно соответствующему необходимому. Требуемый закон $f_c(t)$ осуществляется перестройкой частоты задающего генератора.

Резонансное условие для изображенного на рис.4 контура имеет вид

$$\frac{\alpha \operatorname{tg}(\alpha \rho l_2) + \operatorname{tg} \rho l_1}{1 - \alpha \operatorname{tg}(\alpha \rho l_2) \cdot \operatorname{tg} \rho l_1} = \frac{1}{Z_0 \rho c C} \quad (26)$$

$$\mu_2 = \alpha^2 = 1 + (\mu - 1) \frac{\epsilon_n^{D_2/d_1}}{\epsilon_n^{D_1/d}}$$

где μ - относительная магнитная проницаемость феррита на частоте 14 МГц.

Второе из условий (26) заменяет отрезок линии, частично (в радиальном направлении) заполненный ферритом с проницаемостью μ , эквивалентным ему отрезком линии, полностью заполненным ферритом с проницаемостью μ_2 .

Величина μ_2 (обозначенная для удобства α^2) определена из условия равенства запасенной энергии в ^{реальном} ~~рамках~~ отрезке линии

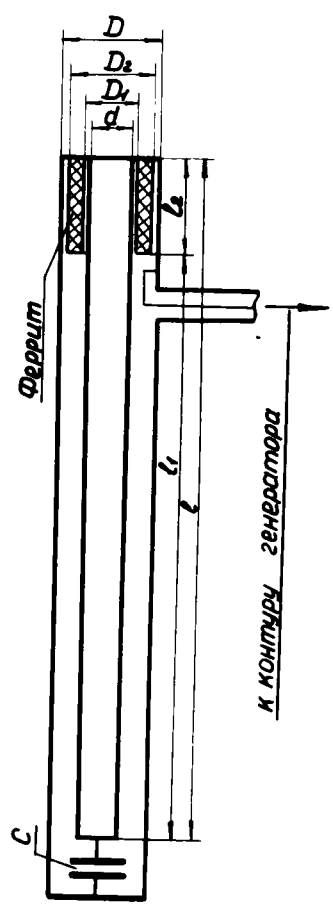
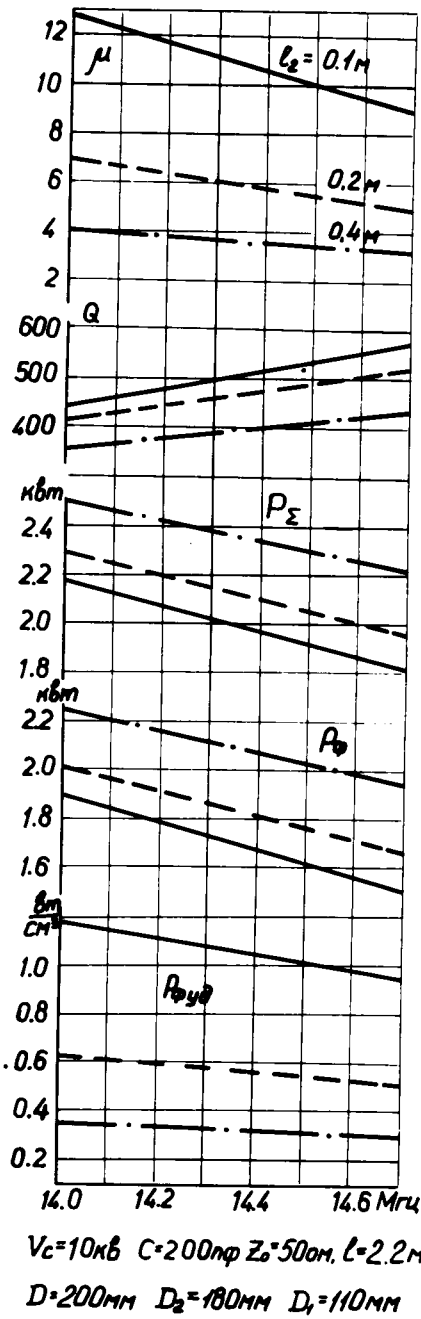


схема резонансного контура с-электрода, настраиваемого ферритами, и расчетные зависимости: зависимости проницаемости феррита μ , добротности контура Q , мощности потерь в контуре P_Σ , полной P_Φ и удельной $P_{уд}$ мощности потерь в ферритах от частоты.

рис 4

и в его эквиваленте в предположении, что $\beta e\sqrt{\mu} < 0.5$. Тот же результат получается, если определять M_2 из условия равенства магнитных потоков.

Мощность потерь в контуре складывается из мощности потерь в меди линии

$$P_A = \frac{r_1}{8\beta} \left(\frac{V_c}{Z_0}\right)^2 \left\{ 2\beta [l_2 + l_1 (\cos^2 \beta \alpha l_2 + \alpha^2 \sin^2 \beta \alpha l_2)] + \sin 2\beta l_1 (\cos^2 \beta \alpha l_2 - \alpha^2 \sin^2 \beta \alpha l_2) + \sin 2\beta \alpha l_2 \left(\frac{1}{\alpha} - 2\alpha \sin^2 \beta l_1\right) \right\} / (\cos \beta \alpha l_2 \cdot \sin \beta l_1 + \alpha \sin \beta \alpha l_2 \cdot \cos \beta l_1)^2 \quad (27)$$

и мощности потерь в феррите

$$P_F = \frac{\mu}{\mu-1} (\alpha^2 - 1) \frac{V_c^2}{8\alpha Z_0} \frac{(2\beta \alpha l_2 + \sin 2\beta \alpha l_2) \operatorname{tg} \delta}{(\cos \beta \alpha l_2 \sin \beta l_1 + \alpha \sin \beta \alpha l_2 \cos \beta l_1)^2} \quad (28)$$

где $r_1 = \frac{R_s}{\pi} \left(\frac{1}{D} + \frac{1}{d}\right) \frac{OM}{M}$, $R_{s \text{ меди}} = 1.81 \cdot 10^{-3} \sqrt{\beta}$ [ОМ],

$\operatorname{tg} \delta$ - тангенс потерь в феррите.

Запасенная в линии реактивная мощность определяется как

$$W = \frac{V_c^2}{8Z_0} \left\{ 2\beta [\alpha^2 l_2 + l_1 (\cos^2 \beta \alpha l_2 + \alpha^2 \sin^2 \beta \alpha l_2)] + \sin 2\beta l_1 (\cos^2 \beta \alpha l_2 - \alpha^2 \sin^2 \beta \alpha l_2) + \alpha \sin 2\beta \alpha l_2 \cos 2\beta l_1 \right\} / (\cos \beta \alpha l_2 \sin \beta l_1 + \alpha \sin \beta \alpha l_2 \cdot \cos \beta l_1)^2 \quad (29)$$

а добротность контура

$$Q = \frac{W}{P_A + P_F} \quad (30)$$

Для осуществления описываемой схемы питания С-электрода необходимы ферритовые сердечники в виде колец (в этом случае они удобно размещаются в коаксиальной линии). Нами были взяты на пробу ферритовые кольца из материала марки 200 НН, используемые на синхроциклотроне ЛФТИ АН СССР в аналогичном устройстве. Из-за отсутствия справочных данных характеристики этого феррита

в интересующем нас диапазоне частот определялись экспериментально.

Для определения параметров ^{феррита} ~~двух~~ μ и $\operatorname{tg} \delta$ сердечник из трех ферритовых колец, охваченный общей подмагничивающей обмоткой, был помещен в четвертьволновую коаксиальную резонансную линию (схема рис. 4). Измеряя зависимость резонансной частоты от тока подмагничивания I и определяя затем расчетным путем (по уравнению (26)) μ , можно найти зависимость $\mu(I)$, а измеряя добротность линии без феррита и с ферритом и пользуясь соотношениями (26 + 30), можно определить $\operatorname{tg} \delta$. Определенные таким образом зависимости $\mu(I)$ и $\operatorname{tg} \delta(f)$ показаны на рис. 5 и 6. Величина μ показана в зависимости от тока подмагничивания (или от числа ампервитков), а величина $\operatorname{tg} \delta$ в зависимости от частоты. Можно отметить, что в небольших пределах изменения частоты величина $\operatorname{tg} \delta$ примерно постоянна и составляет около $1 \cdot 10^{-2}$.

Полученные выше соотношения были использованы для оценочного расчета контура С-электрода; результаты этого расчета представлены на рис. 4.

Величина мощности потерь в расчете определена для $V_c = 10$ кв. Из рис. 4 видно, что величины мощности потерь и добротности контура в диапазоне частот меняются незначительно. Можно заметить, что почти вся мощность потерь сосредоточена в феррите. При напряжении на С-электроде $V_c = 35$ кв значения мощности потерь, показанные на рис. 4 должны быть увеличены в 12.25 раза и составят около 25 квт. Хотя сама по себе величина высоко-частотной мощности в 25 квт может быть реализована, трудность

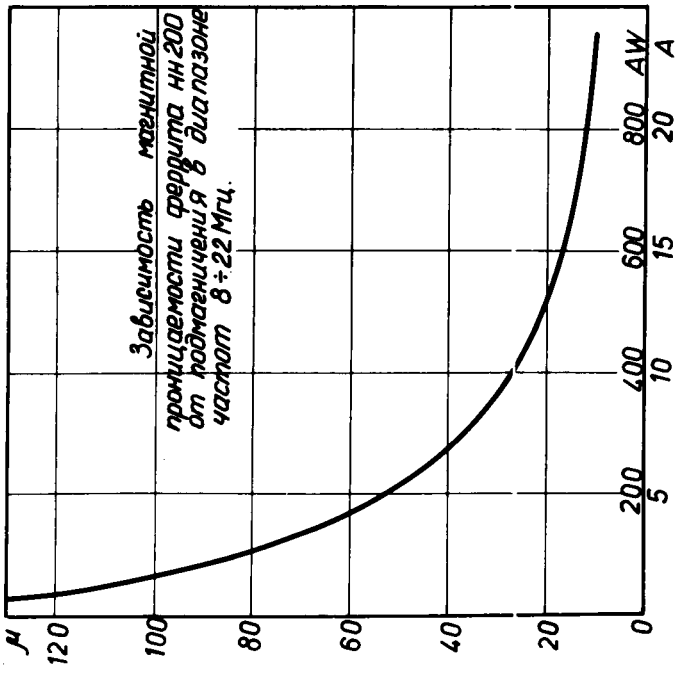


рис 5

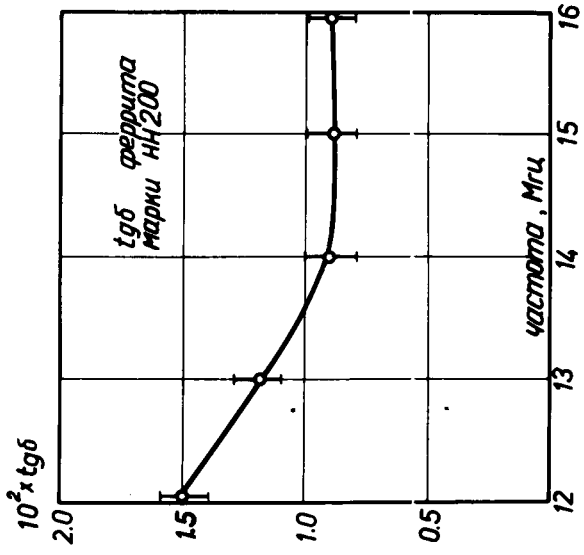


рис 6

состоит в том, что почти вся мощность поглощается в ферритах. При этом удельная мощность, рассеиваемая в 1 см^3 феррита (см. рис.4), составляет около 6 вт/см^3 (при $V_c = 35 \text{ кв}$), что в 20 раз превышает величину, считающуюся приемлемой при интенсивном охлаждении феррита.

Выход состоит, с одной стороны, в увеличении объема феррита за счет увеличения ϵ_2 (при одновременном уменьшении μ). При этом полная мощность потерь в ферритовом сердечнике изменяется незначительно (см.рис.), удельная же мощность уменьшается обратнопропорционально объему.

Более радикальным средством решения этой проблемы было бы применение ферритов с меньшим, скажем в 5 раз, ϵ_2 . В этом случае уменьшается как удельная мощность (решается проблема охлаждения ферритов), так и полная, что позволяет существенно упростить высокочастотный генератор.

Из проведенных оценок можно сделать вывод, что при необходимости иметь на С-электроде амплитуду напряжения порядка 10 кв модулятор с применением ферритов марки 200 НН может быть осуществлен, при этом по сравнению со схемой широкополосого контура требуется на порядок меньшая величина высокочастотной мощности. При этом, конечно, происходит усложнение схемы за счет введения в нее модулятора тока подмагничивания.

Что касается применения такой схемы при напряжении на С-электроде $\sim 35 \text{ кв}$, то необходимо, с одной стороны, изыскание ферритов с лучшим ϵ_2 и, с другой стороны, разработка и исследование схемы охлаждения, позволяющей увеличить допустимую удельную мощность, рассеиваемую в феррите.

В обоих случаях необходимо также исследовать возможность работы ферритового модулятора с частотой порядка 500 + 1000 гц.

7. Рассмотрим еще одну схему питания С-электрод^а, основанную на модуляции частоты контура С-электр^{ода} с помощью емкостного вариатора. Схема в этом случае будет иметь вид, показанный на рис.7. Резонансный контур С-электр^{ода} в этом случае является также и резонансным контуром оконечного каскада генератора, а передающая мощность линия отсутствует.

В схеме на рис.7 емкость С-электрода обозначена C_0 , емкость вариатора - C_2 , выходная емкость лампы оконечного каскада C_r и емкость связи - C_1 .

При расчете этой схемы использованы следующие соотношения:
Резонансное условие

$$\rho c z_0 C_2 = \frac{\operatorname{tg} \rho l + \rho c z_0 C_0}{\rho c z_0 C_0 \operatorname{tg} \rho l - 1} - \rho c z_0 \frac{C_1 C_r}{C_1 + C_r} \quad (31)$$

Добротность

$$Q = \frac{\rho z_0}{r_1} \quad (32)$$

Мощность потерь в линии

$$P_1 = \frac{r_1 V_c^2}{8 \rho z_0^2} [(\rho c z_0 C_0)^2 (2 \rho l + \sin 2 \rho l) + (2 \rho l - \sin 2 \rho l) + 2 \rho c z_0 C_0 (1 - \cos 2 \rho l)] \quad (33)$$

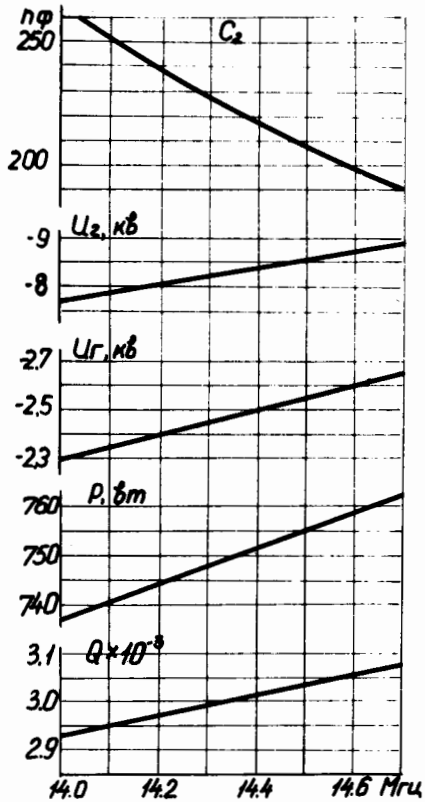
Напряжение на вариаторе

$$U_2 = V_c (1 - \rho c z_0 C_0 \operatorname{tg} \rho l) \cos \rho l \quad (34)$$

Выходное напряжение генератора

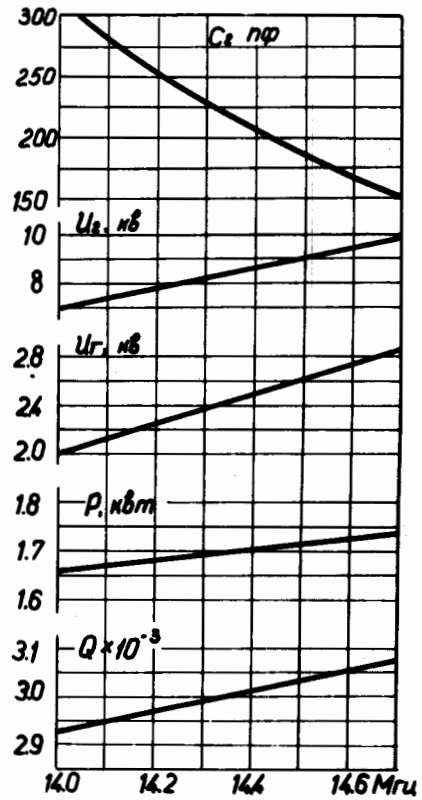
$$U_r = \frac{C_1}{C_1 + C_r} V_c (1 - \rho c z_0 C_0 \operatorname{tg} \rho l) \cos \rho l \quad (35)$$

Результаты расчета для двух значений длины линии (полу-волновая и волновая линии) представлены на рис.7. Из графиков



$$l = 5 \text{ м} \quad C_1 = 85 \text{ нФ}$$

$$V_0 = 10 \text{ кВ} \quad C_0 = 200 \text{ нФ} \quad C_r = 200 \text{ нФ} \quad Z_0 = 50 \text{ Ом} \quad D = 200 \text{ мм} \quad d = 87 \text{ мм}$$



$$l = 15.5 \text{ м} \quad C_1 = 81 \text{ нФ}$$

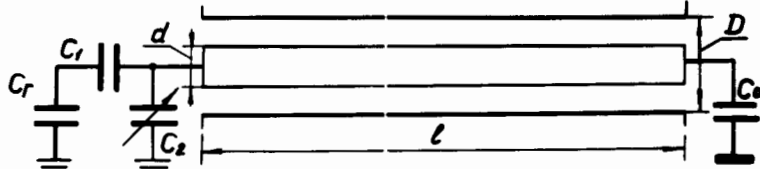


Схема резонансного контура С-электрода, настраиваемого емкостным вариатором, и расчетные зависимости емкости вариатора C_2 , напряжения на нём U_2 , напряжения на генераторе U_G , мощности потерь в контуре P и его добротности Q от частоты.

рис 7

рисунка видно, что требуемое значение высокочастотной мощности в этой схеме уменьшается^{ж)} по сравнению со схемой с ферритовым модельером частоты в два раза для длинной линии ($\ell = 15.5$ м) и в 6 раз для короткой ($\ell = 5$ м). Требования к величине максимальной емкости вариатора и коэффициенту перекрытия оказываются весьма умеренными, однако величина напряжения на вариаторе оказывается практически равной амплитуде напряжения на С-электроде.

Трудность осуществления этой схемы связана с необходимостью синхронизации вариатора С-электрода с основным вариатором синхроциклотрона.

Следует также отметить, что поскольку закон изменения резонансной частоты контура С-электрода во времени задается геометрией вариатора (формой роторных и статорных пластин), и, с другой стороны, ~~до~~ полоса частот контура $2\Delta f = \frac{f}{Q}$ оказывается очень узкой (~ 3 кГц), закон изменения $f_c(\epsilon)$ оказывается жестко связанным с геометрией вариатора и не может изменяться в процессе эксперимента (с помощью задающего генератора) в отличие от рассмотренных выше схем.

Однако, схема с емкостным вариатором частоты обеспечивает получение больших амплитуд напряжения на С-электроде при наименьшей высокочастотной мощности и с этой точки зрения она предпочтительнее других схем.

8. Все три рассмотренные схемы питания С-электрода имеют как свои достоинства, так и недостатки. Первая схема (с широкополосным контуром) является наиболее простой. Кроме того, пос-

^{ж)} Поскольку при определении мощности потерь в линии в качестве r_1 использовано его расчетное значение, реальный выигрыш будет меньше.

кольку в ней закон изменения $f_c(t)$ полностью определяется задающим генератором, эта схема позволяет подобрать оптимальный закон изменения $f_c(t)$ непосредственно на ускорителе. К сожалению, как указывалось, эта схема применима только при малых ^инапряжениях на С-электроде.

Схема с емкостным вариатором частоты, напротив, позволяет достигнуть больших величин напряжения на С-электроде при умеренной высокочастотной мощности. Однако, закон изменения $f_c(t)$ жестко задается геометрией вариатора и не может легко изменяться в процессе эксперимента. Схема с ферритовым модулятором частоты занимает промежуточное положение с точки зрения высокочастотной мощности между этими двумя, обладая в то же время необходимой гибкостью в выборе закона измерения $f_c(t)$ (этот закон может изменяться в некоторых пределах с помощью задающего генератора и в широком диапазоне - за счет изменения зависимости подмагничивающего тока от времени).

Выбор той или иной схемы питания в значительной степени зависит от требуемой величины напряжения С-электрода. Полученные выше соотношения, определяющие необходимую величину V_c , требуют экспериментальной проверки (особенно это касается режима многократного свипирования), которая может быть выполнена на действующем синхроциклотроне ОИЯИ. Из соотношения (7) следует; что при параметрах синхроциклотрона ($K_0 = 2.4$;
 $K = 1.1$; $E_{r0} = 0.94 \cdot 10^9$ эв; $E_f = 1.62 \cdot 10^9$ эв; $f_{r0} = 25.5$ мгц; $f_r = 14.1$ мгц; $C_0 \varphi_{r2} = 0.2$) и требуемой степени растяжки $m = 20$ необходимая величина eV_c в 7 раз меньше, чем eV_g , т.е. составляет окло 3 кэв. При этом $(C_0 \varphi_{r2})_c = 0.07$.

Поэтому для экспериментального исследования процесса растяжки на действующем синхроциклотроне можно использовать простейшую схему питания С-электрода с широкополосным контуром. Необходимая полоса частот определяется из (8) при $n = 8 \cdot 10^{-2}$, $R = 275$ см и $\Delta R = 10$ см и оказывается равной 325 кгц. Для получения такой полосы частот добротность контура Q должна быть около 40. Тогда из соотношений (20+25) при емкости $C = 170$ пф и $Z_0 = 60$ (определены экспериментально) находим, что длина линии должна быть $l = 2,75$ м; $P = 2.3$ квт (при $V_c = 3$ кв.). Точка подключения шунтирующего сопротивления $R = 50$ л. находится от закоротки на расстоянии $X = 39$ см., а точка подключения питающего фидера с $Z_0 = 60$ ом - на расстоянии $y = 42.5$ см. Изготовление необходимой аппаратуры и проведение исследований на синхроциклотроне может быть осуществлено до середины 1973 года.

Литература

1. Н.К.Абросимов, Р.П.Девятериков, А.Г.Котов, А.В.Куликов, Г.Ф.Михеев, Н.Н.Чернов. Система увеличения длительности импульса протонного пучка синхроциклотрона на I Гэв ЛИЯФ. АН СССР, ЛИЯФ, №1 - 1972 г. Ленинград.
2. S. Lindvåg, CERN Int. rep. MSC-71-1 Febr. 1971

Л.И.Иванов