

С 345g

М-346

20/XII-61

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P9 - 3567



И.М. Матора, Р.В. Харьюзов

О СОГЛАСОВАНИИ РЕЗОНАТОРА МИКРОТРОНА  
С ВОЛНОВОДНЫМ ТРАКТОМ

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

1967.

Матора И.М., Харьюзов Р.В.

P9-3567

О согласовании резонатора микротрона с волноводным трактом

Исследован вопрос об условиях согласования в волноводном тракте микротрона при различных соотношениях между мощностью потерь в стенках резонатора и мощностью нагружающего электронного пучка. Даны формулы, связывающие КСВН в волноводном тракте и нагрузку резонатора. Имеется удовлетворительное согласие теории с экспериментом.

Показано, что с точки зрения устойчивости процесса ускорения предпочтительна связь резонатора с волноводом больше критической.

**Препринт Объединенного института ядерных исследований.  
Дубна, 1967.**

Matora I.M., Khar'yuzov R.V.

P9-3567

On the Matching of the Microtron Resonator with  
the Waveguide

The problem of matching between the microtrone waveguide and the resonator at different loading electron beam powers is studied. The formulae connecting the standing wave coefficient in the waveguide and the resonator load are given. The theory well agrees with experiment.

It is shown that, from the point of view of the acceleration process stability, the connection between the resonator and the waveguide is preferred to be more than the critical one.

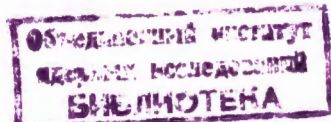
**Preprint, Joint Institute for Nuclear Research,  
Dubna, 1967.**

P9 - 3567

И.М. Матора, Р.В. Харьюзов

О СОГЛАСОВАНИИ РЕЗОНАТОРА МИКРОТРОНА  
С ВОЛНОВОДНЫМ ТРАКТОМ

Направлено в ЖТФ



5496/1 пр.

## Выводы

Условия работы резонатора микротрона, в котором импульсный ток ускоренных электронов составляет 50–100 ма, а энергия – 30 Мэв, имеют ряд особенностей. Одна из них заключается в том, что мощность, затрачиваемая на ускорение электронов (нагрузка), в несколько раз превышает значение мощности, расходуемой на возбуждение необходимого поля в резонаторе (омические потери в его стенках). Причина этой особенности заключается в том, что нагрузка пучком в микротроне имеет как бы параллельное включение, пучок в нем проходит через единственный ускоряющий зазор многократно. Вместе с тем, мощность, затрачиваемая на возбуждение микротронного резонатора, невелика, так как размеры резонатора малы. Она составляет обычно 0,5–0,7 Мвт для резонаторов на длину волны 10 см. С другой стороны, даже без учета потерь ускоряемых электронов импульсная мощность в пучке 50–100 ма 30 Мэв равна 1,5–3 Мвт, а с учетом потерь ее следует, по крайней мере, удвоить. Такое отношение между мощностями нагрузки и возбуждения резонатора существует во время нормальной работы, в то время как при пуске ускорителя имеют место и все промежуточные его значения, поскольку ток ускоряемых электронов плавно увеличивается от нуля до номинальной величины, а мощность потерь в стенках резонатора неизменна. Соответственно увеличивается и мощность, передаваемая через волноводную линию от генератора к резонатору от значения, близкого к нулю при пуске до величины, превышающей мощность возбуждения резонатора в 5–10 раз при номинальном режиме работы ускорителя. Поэтому как с точки зрения повышения КПД системы, так и с точки зрения электрической прочности волноводов, желательно обеспечить такую связь резонатора с линией, чтобы при определенной, наперед заданной рабочей нагрузке резонатора пучком электронов, в волноводном тракте имел место режим бегущей волны.

В настоящей работе дано решение ряда вопросов, связанных с этой задачей.

## 1. Теория

Связь в СВЧ линии передачи между коэффициентом стоячей волны  $\Gamma$ , ее волновым сопротивлением  $z_0$  и полным сопротивлением нагрузки  $z_H$  выражается известным соотношением<sup>1/</sup>:

$$\Gamma = \frac{|z_H + z_0| + |z_H - z_0|}{|z_H + z_0| - |z_H - z_0|} \quad (1)$$

или

$$\Gamma = \frac{|z_H + z_0| + |z_0 - z_H|}{|z_H + z_0| - |z_0 - z_H|} \quad (2)$$

При этом имеется в виду, что  $z_H$  может быть как больше, так и меньше  $z_0$ , но  $\Gamma$  всегда является действительным числом, не меньшим единицы.

В случае, когда сопротивления линии и нагрузки являются чисто активными и равными соответственно  $R_0$  и  $R_H$ , соотношения (1) и (2) можно записать:

$$\Gamma = \frac{R_H}{R_0} = \frac{G_0}{G_H} \quad \text{при} \quad R_H > R_0 \quad (3)$$

$$\text{или} \quad \Gamma = \frac{R_0}{R_H} = \frac{G_H}{G_0} \quad \text{при} \quad R_H < R_0, \quad (4)$$

где  $G_0 = \frac{1}{R_0}$  - активная проводимость линии

$G_H = \frac{1}{R_H}$  - активная проводимость нагрузки.

Оконечной нагрузкой для линии в микротроне является ускоряющий объемный резонатор. Представляя его эквивалентным параллельным колебательным контуром<sup>1,2,4/</sup> с сосредоточенными постоянными (рис. 1), связанным с линией передачи идеальным трансформатором<sup>х)</sup> с коэффициентом трансформации  $K$ , можно

х) Здесь мы пренебрегаем потерями в окне связи и его реактивностью.

записать выражение для суммарной эквивалентной проводимости при резонансе<sup>х)</sup>  $G_{\Sigma}^{*}$  в сечении  $a-a$  в виде:

$$G_{\Sigma}^{*} = k^2 (G_p + G_n), \quad (5)$$

где  $G_p$  — проводимость связанного с линией резонатора без нагрузки пучком электронов,

$G_n$  — проводимость нагружающего лучка.

Выражение (3) с учетом (5) примет вид:

$$\gamma = \frac{G_0}{G_{\Sigma}^{*}} = \frac{G_0}{k^2 (G_p + G_n)} = \frac{G_0}{k^2 G_p (1 + \frac{G_n}{G_p})}. \quad (6)$$

Множитель  $\frac{G_0}{k^2 G_p} = r_0$  представляет собой КСВН в линии в режиме холостого хода, когда нагрузка пучком электронов отсутствует. Величина  $\frac{G_n}{G_p} = \frac{1}{x}$  характеризует относительную нагрузку резонатора, т.е. отношение мощности в пучке к мощности потерь в резонаторе, поскольку мощность  $P$  и проводимость связаны зависимостью<sup>/2/</sup>:

$$P = \frac{1}{2} U_m^2 G. \quad (7)$$

В окончательном виде выражение (6) может быть записано:

$$\gamma = r_0 \frac{x}{x+1} \quad \text{при} \quad G_{\Sigma}^{*} \leq G_0. \quad (8)$$

Путем аналогичных рассуждений, учитывая, что коэффициенты  $\gamma$  и  $r_0$  всегда больше или равны единице, из (4) можно получить:

$$\gamma = \frac{1}{r_0} \frac{x+1}{x} \quad \text{при} \quad G_{\Sigma}^{*} > G_0, \quad k^2 G_p \leq G_0 \quad (9)$$

$$\gamma = r_0 \frac{x+1}{x} \quad \text{при} \quad G_{\Sigma}^{*} > G_0, \quad k^2 G_p > G_0 \quad (9')$$

---

х) Все дальнейшее рассмотрение проводится для резонатора, настроенного на частоту генератора.

Как известно, коэффициент связи  $\beta = \frac{1}{r_0}$  для связи меньше критической и  $\beta = r_0$  для связи больше критической<sup>/1/</sup>. Отсюда выражения (8), (9) и (9') позволяют проследить изменение коэффициента стоячей волны  $\Gamma$  в линии передачи в зависимости от относительной нагрузки резонатора пучком электронов  $x$  для различных значений исходной связи резонатора с волноводом, определяемых величиной  $r_0$ .

На рис. 2 приведены рассчитанные по (8) и (9) зависимости  $\Gamma$  от  $x$  для  $r_0$ , равных 1,4; 2; 3; 5 и 10, соответствующие исходной связи больше критической. Здесь по мере уменьшения  $x$  от  $x = \infty$  до  $x_{\text{опт}}$  (увеличение нагрузки)  $\Gamma$  во всех случаях монотонно уменьшается и при

$$x_{\text{опт}} = \frac{1}{r_0 - 1} \quad (10)$$

наступает полное согласование в волноводном тракте для заданного  $\beta = r_0$ , т.е. оказывается  $\Gamma = 1$  и  $G_0 = k^2 (G_p + G_n) = G_{\Sigma}^{aa}$ . Если продолжать увеличение нагрузки и после прохождения точки  $x_{\text{опт}}$ , то  $G_{\Sigma}^{aa}$  становится больше проводимости линии  $G_0$ , и формулу (8) следует заменять на (9). Легко видеть, что значения  $\Gamma$  после прохождения момента полного согласования с увеличением нагрузки монотонно возрастают.

Здесь уместно отметить следующее: факт замены формулы (8) на (9), вызванный изменением лишь нагрузки настроенного резонатора, соответствует по известным представлениям<sup>/1/</sup> изменению характера связи нагруженного резонатора, которая до момента полного согласования была больше критической при  $x = x_{\text{опт}} = \frac{1}{r_0 - 1}$  - критической, а после этого стала меньше критической. То, что этому соответствует и физическая сущность, подтверждается скачком фазы на  $\pi$  в суммарной (падающая плюс отраженная) волне в волноводном тракте перед резонатором, который всегда наблюдается при прохождении точки полного согласования. Таким образом, мы видим, что характер связи сильно нагруженного резонатора с волноводным трактом определяется не только выбранным окном связи (входящим в формулы через величину  $r_0$ ) и проводимостью ненагруженного резонатора  $G_p$ , но также при прочих постоянных условиях и величиной его нагрузки. Другими словами, характер связи резонатора, рассчитанного на большие нагрузки, в котором фиксированы окно связи с волноводным

трактом и собственная проводимость, остается неопределенным, если величина его нагрузки не фиксирована.

В противоположность этому, характер связи резонатора, предназначенного для работы при малых нагрузках (рис. 3), т.е. в том случае, когда еще не нагруженный резонатор уже имеет меньшую критической связи, от нагрузки не зависит. Здесь увеличение нагрузки (уменьшение  $x$ ) ведет к возрастанию КСВН в линии для всех значений  $r_0$ , поскольку эквивалентная суммарная проводимость  $G_{\Sigma}^{aa} = k^2 (G_p + G_H)$  (см. 4) превосходит проводимость линии  $G_0$  даже в случае, когда проводимость пучка  $G_H = 0$ .

Таким образом, характер связи тракта и резонатора можно классифицировать с помощью кривых  $r(x, r_0)$ , причем связь меньше критической всегда соответствует такому набору параметров, при котором  $\frac{dr}{dx} < 0$ , связь критическая имеет место в точке  $x = x_{\text{опт}}$ , и связь больше критической — там, где  $\frac{dr}{dx} > 0$ .

## 2. Экспериментальное исследование влияния изменяющейся нагрузки резонатора на согласование в волноводном тракте

Зависимости (8) и (9) были проверены экспериментально при "холодных" измерениях, когда мощность генератора равнялась единицам милливатт, и на действующем ускорителе при мощности генератора порядка нескольких мегаватт в импульсе<sup>/5/</sup>.

### а) "Холодные" измерения

Прямоугольный (или цилиндрический) медный объемный резонатор микротрона, предназначенный для работы в 10-сантиметровом диапазоне волн, был связан с волноводным трактом 72 x 34 мм прямоугольным окном связи. Один из размеров окна (высота) из конструктивных соображений оставался неизменным. Другой размер (ширина) варьировался ступенями через 1 мм в пределах от 11,5 до 18,5 мм в прямоугольном резонаторе и от 17 до 24 мм в цилиндрическом. Для каждого значения ширины окна связи была снята зависимость коэффициента стоячей волны  $r$  в волноводной линии при настроенном резонаторе от величины



нагрузки последнего при фиксированной частоте. КСВН измерялся с помощью волноводной измерительной линии ИВЛ-1 по типовой схеме. Нагрузка резонатора могла изменяться в широких пределах с помощью приспособления, которое состояло из тонкого металлического зонда, нагруженного через коаксиальный кабель термисторным измерителем мощности ВИМ-1. Зонд вводился в резонатор через одно из пролетных окон. Каждой глубине погружения зонда соответствовало определенное значение мощности, отбираемой из резонатора. Это значение определялось по показанию измерителя мощности. Расстройка, вносимая в резонатор реактивностью зонда, компенсировалась с помощью механической настройки. Следует особо отметить, что существенная часть измеряемой этим методом мощности нагрузки может оказаться излученной в пространство, если не принять меры, исключающие такую утечку.

Энергетический баланс в системе волновод-резонатор-измеритель мощности можно представить в виде выражения:

$$P = P_{\text{н}} + P_{\text{отр}} + P_{\text{р}}, \quad (11)$$

где  $P$  - мощность, поступающая от генератора к резонатору,

$P_{\text{н}}$  - мощность нагрузки, отбираемая термистором,

$P_{\text{отр}}$  - отраженная мощность,

$P_{\text{р}}$  - мощность потерь в стенках резонатора (в нее же входит незначительная мощность, излучаемая резонатором через пролетные окна).

Величина мощности  $P$  находилась непосредственным измерением и в течение опыта поддерживалась постоянной. Значения  $P_{\text{отр}}$  находились расчетом по известной величине КСВН, соответствующей данному значению  $P_{\text{н}}$ . После этого вычислялась мощность потерь в стенках

$$P_{\text{р}} = P - (P_{\text{н}} + P_{\text{отр}})$$

и отношение  $\frac{P_{\text{р}}}{P_{\text{н}}} = \tau$ , характеризующее степень нагрузки резонатора. На рис. 2 кружками обозначены экспериментальные точки кривых  $\tau$  от  $x$ , снятые при "холодных" измерениях для  $\gamma_0$ , равных 1,4; 2 и 5, соответствующие исходной связи больше критической. На рис. 3 кружки соответствуют также результатам "холодных" измерений при связи меньшей критической. В обоих случаях отклонение экспериментальных кривых от расчетных лежит в пределах ошибок измерений.

## б) Измерения на ускорителе

Поскольку в микротроне желательно иметь полное согласование ( $\Gamma = 1$ ) в рабочем режиме, когда мощность в пучке больше мощности потерь в резонаторе ( $x_{\text{опт}} < 1$ ), очевидно, что всегда целесообразно реализовать режим, соответствующий исходной связи "большой критической". При этом выбор окна связи следует делать, учитывая следующие два противоречащие друг другу фактора. С одной стороны, для повышения коэффициента полезного действия ускоряющей системы нужно стремиться к меньшим значениям  $x_{\text{опт}}$ . Но, с другой стороны, как это следует из (10) и рис.2, чем ниже  $x_{\text{опт}}$ , тем больше  $\Gamma_0$  и тем хуже будет согласование в волноводе в тот промежуточный период времени, когда резонатор вводится в действие, и нагрузка электронным пучком еще не достигла оптимума. На первый взгляд кажется, что последнее обязательство можно обойти, если заранее накаливать катод в резонаторе до такой температуры, чтобы нагрузка эмиттированным с него пучком была близка к оптимальной еще до начала ускорения по всем орбитам. Однако такая процедура может дать желательный эффект при столь большом перекале катода, что ток эмиссии с его торца во много раз превзойдет обычное рабочее значение, так как многократное прохождение электронов через резонатор еще не имеет места. Поэтому все попытки воспользоваться предварительно нагретым катодом для улучшения полного согласования тракта СВЧ с неполностью введенным в действие резонатором приводили лишь к преждевременному разрушению катода и не достигали цели.

Опыт показал, что всегда получение на микротроне ускоренного пучка сопровождается плавным изменением КСВН вдоль правой ветви той кривой, которая соответствует заданным  $\Gamma_0$  и  $x_{\text{опт}}$ . Кривая, обозначенная на рис. 2 пунктирной линией с треугольниками, получена на действующем ускорителе с помощью методики, изложенной ниже при  $\Gamma_0 = 4,5$ . Здесь  $x_{\text{опт}}$  равен приблизительно 0,3.

На рис. 4 сплошной линией обозначена зависимость  $\frac{1}{x_{\text{опт}}}$  от  $\Gamma_0$  в соответствии с выражением (10) и нанесены результаты эксперимента. Черными точками изображены результаты "холодных" измерений, а крестиками - результаты измерений на действующем ускорителе, которые получены следующим образом.

СВЧ тракт<sup>3/</sup> микротрона Лаборатории нейтронной физики имеет измерители перепада температуры воды, охлаждающей последовательно резонатор, водя-

ную нагрузку для отраженной от резонатора мощности и так называемую "балластную" водяную нагрузку. По разности температур охлаждающей воды на входе и выходе резонатора находилась рассеиваемая в нем мощность  $P_{\Sigma \text{рез}}$ . Величина этой мощности зависит от потерь в стенках ( $P_p$ ), количества и энергии электронов, выбывших из ускорения и бомбардирующих резонатор ( $P'_N$ ), и, наконец, от мощности подогрева катода, которая известна ( $P_{\text{подогрева}}$ ).

Мощность потерь в стенках ( $P_p$ ), соответствующая заданной напряженности электрического ускоряющего поля в средней части резонатора, находилась по нагреву охлаждающей резонатор воды при ускорении электронов, инжектированных с кромок пролетных окон за счет автоэлектронной эмиссии (катод выключен). Процесс ускорения до конечной орбиты сопровождался резким возрастанием  $\gamma$ -фона в зале микротрона.

Мощность  $P'_N$  вычислялась как разность

$$P'_N = P_{\Sigma} - (P_p + P_{\text{подогрева}}).$$

Общая мощность электронной нагрузки  $P_N$  находилась суммированием  $P'_N$  и  $P''_N$ , где  $P''_N$  — произведение величины электронного тока на конечной орбите, ускоряющего напряжения и количества орбит. Кроме того, с помощью осциллографирования огибающей импульса отраженной волны определялся КСВН в волноводе при любой степени нагрузки резонатора. По определению <sup>1/</sup>:

$$\Gamma = \frac{U_{\text{пад}} + U_{\text{отр}}}{U_{\text{пад}} - U_{\text{отр}}},$$

где  $U_{\text{пад}}$  — напряжение падающей волны,

$U_{\text{отр}}$  — напряжение отраженной волны.

Значения  $U_{\text{пад}}$  и  $U_{\text{отр}}$  для любого отношения  $\frac{P_N}{P_p} = \frac{1}{x}$  могут быть получены с приемлемой точностью из осциллограммы отраженного от резонатора импульса (рис. 5) благодаря имеющему место полному рассогласованию на фронтах импульса, если используемые приборы (детектор и синхроскоп) не вносят значительных амплитудных или частотных искажений. Последние могут особенно сильно проявляться при измерении величины  $U_{\text{пад}}$ , так как длительность переходных процессов на фронтах импульса незначительна. Совпадение экспериментальных результатов и расчета можно считать удовлетворительным, имея в виду сложность измерения многих параметров на резонаторе с высокой добротностью.

### 3. Зависимость $\gamma_0$ от ширины окна связи резонатора

Измерения  $\gamma_0$  в волноводе 72 x 34 мм с прямоугольным и цилиндрическим настроенными резонаторами на конце в зависимости от ширины окна связи дали результаты, приведенные на рис. 6. Ход кривой для цилиндрического резонатора более плавный вследствие того, что толщина меди, в которой фрезеруется окно связи, в нем к краям возрастает, тогда как в прямоугольном резонаторе она постоянна.

### 4. Выбор связи

Вышеизложенный материал лег в основу следующей простой методики выбора связи резонатора с волноводным трактом микротрона, которая эффективно применяется в ЛНФ ОИЯИ в течение 3-х лет.

По желаемому отношению  $\left(\frac{P_H}{P_p}\right) = \frac{1}{x}$  с помощью графика (рис. 4) определяется однозначно ему соответствующее значение  $\gamma_0$ . Затем с помощью зависимости рис. 8 (связь больше критической) находится необходимая ширина окна связи. Проверка правильности такого выбора на "холодных" измерениях не требуется, так как ни в одном случае ошибок в выборе связи не было. Микротрон Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ был запущен в 1964 году, причем значение  $\left(\frac{P_H}{P_p}\right)$  в первые месяцы его работы составляло лишь 3. Тогда мы опасались нарушений электрической прочности при возникновении в волноводе стоячей волны в начальный период ввода резонатора в действие, когда КСВН был близок к значению  $\gamma_0$ . Однако в дальнейшем выбирались все большие значения  $\left(\frac{P_H}{P_p}\right)_{\text{опт}}$ , и экспериментально было показано, что если период ввода резонатора в действие максимально сокращать и делать его продолжительным только при первой после сборки ускорителя тренировке, то можно стабильно работать и при гораздо больших значениях  $\left(\frac{P_H}{P_p}\right)_{\text{опт}}$ .

В настоящее время рабочее значение  $\left(\frac{P_H}{P_p}\right)_{\text{опт}}$  составляет 6-7. Это соответствует коэффициенту полезного действия резонатора (отношение СВЧ - мощности, затраченной на ускорение выведенных и потерянных на ускорительном тракте электронов ко всей вошедшей в резонатор мощности) около 85%. То, что в начальный период ввода резонатора в действие от него отражается около 60%

всей мощности, не приводит к разрушительным последствиям, так как эта ситуация имеет место в течение лишь 15-30 минут пускового периода ускорителя после очередной сборки и нескольких секунд после остановки без снятия нагрева катода. С другой стороны, мощность, вводимая в ненагруженный резонатор, невелика (0,7 Мвт), а по мере увеличения нагрузки электронным пучком соответствующее увеличение входимой мощности сопровождается улучшением согласования в волноводе и уменьшением КСВН вплоть до единицы.

### 5. Нагрузочные характеристики и устойчивость процесса ускорения

Будем называть кривые, заданные формулами (8), (9) и (9'), нагрузочными характеристиками системы волноводный тракт - резонатор и рассмотрим их с точки зрения устойчивости работы ускорителя.

Выразим полную мощность  $P_{\text{н}} + P_{\text{р}} = P_0$ , поглощаемую в резонаторе, в виде

$$P_0 = P_0 (1 - |\Gamma|^2),$$

причем мощность генератора  $P = \text{const}$ .  $\Gamma$  - есть коэффициент отражения в системе.

Пользуясь известным выражением  $|\Gamma| = \frac{r-1}{r+1}$  и формулами (8), (9) и (9'), получаем

$$P_0 = \left\{ \begin{array}{l} 4P_{\Gamma_0} \frac{x(x+1)}{[(\Gamma_0+1)x+1]^2} \\ 4P_{\Gamma_0} \frac{x(x+1)}{[(\Gamma_0+1)x+1]^2} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{в соответствии с (8)} \\ \text{---} \quad \quad \quad (9) \\ \text{---} \quad \quad \quad (9') \end{array}$$

Легко видеть, что для связи больше критической всегда

$$\frac{dP_0}{dx} < 0 \quad \text{и} \quad \frac{dP_0}{dx} > 0$$

для связи меньше критической.

Физически это означает следующее: любое случайное изменение нагрузки резонатора при его связи с трактом больше критической сопровождается автоматич-

ческим изменением того же знака мощности  $P_0$  в резонаторе, что способствует сохранению процесса ускорения. Изменение же нагрузки в резонаторе в случае меньше критической связи вызывает изменение мощности  $P_0$  противоположного знака, и процесс ускорения здесь будет неустойчивым. Отсюда следует следующий вывод. С точки зрения устойчивости процесса ускорения предпочтительна связь резонатора с волноводным трактом больше критической.

#### *Л и т е р а т у р а*

1. Э.Л. Гинзтон. Измерения на сантиметровых волнах. И.Л., Москва, 1960.
2. И.В. Лебедев. Техника и приборы сверхвысоких частот. Г.Э.И., 1961.
3. И.М. Матора, Р.В. Харьюзов. ПТЭ, № 3, 28 (1967).
4. О.С. Мялованов, И.С. Шедрия. Сб. Ускорителя, вып. У, 1963, стр. 146.
5. И.М. Матора, Р.В. Харьюзов, А.И. Грияберг. Препринт ОИЯИ 9-3376, Дубна 1967.

Рукопись поступила в издательский отдел  
27 октября 1967 г.

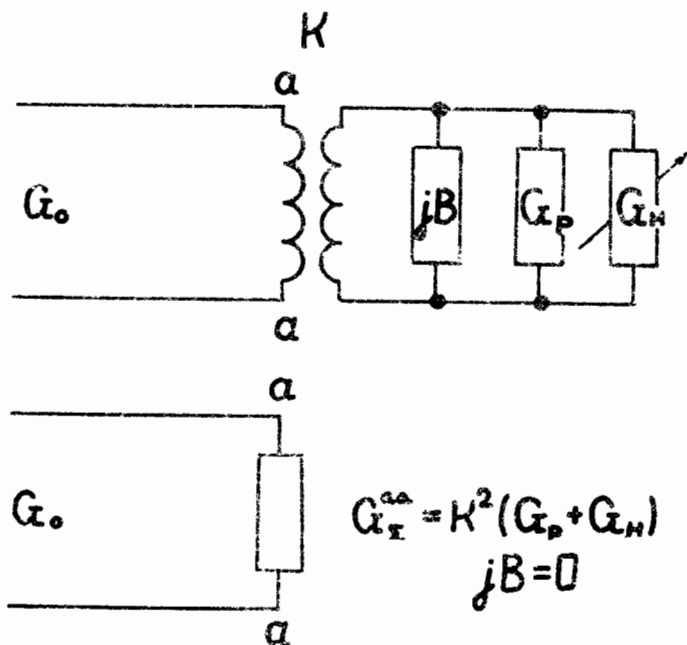


Рис. 1. Эквивалентная схема резонатора микрополоски на резонансной частоте без учета потерь в окне связи.

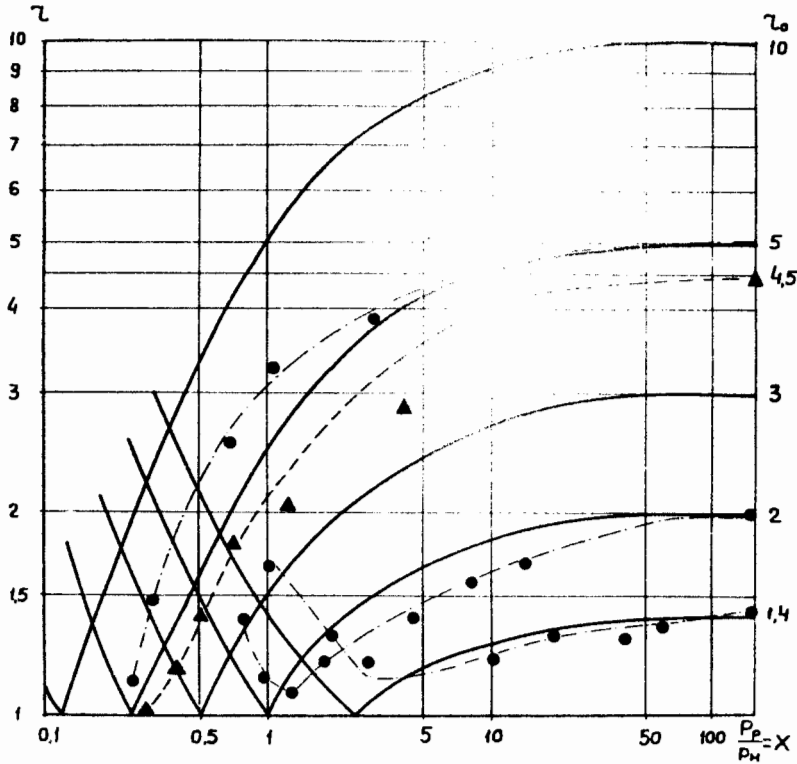


Рис. 2. Зависимости КСВН в линии ( $Q$ ) от относительной нагрузки резонатора  $X$  для исходной связи больше критической  
 — — расчет ( $Q_0 = 1,4; 2; 3; 5; 10$ ); ● — — ● — "холодные" измерения ( $Q_0 = 1,4; 2; 5$ ); ▲ — — ▲ — измерения на ускорителе ( $Q_0 = 4,5$ ).



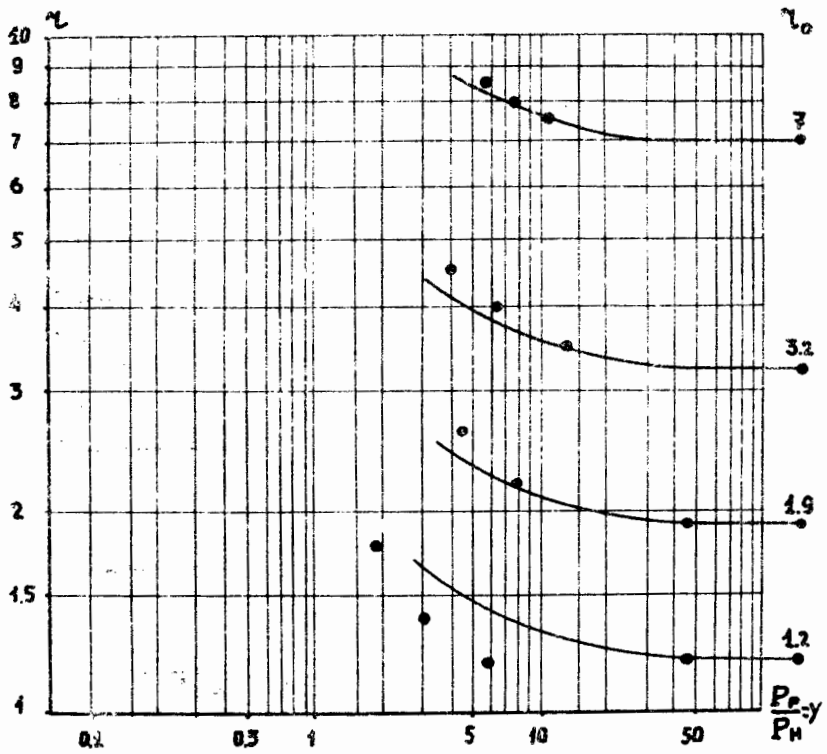


Рис. 3. Зависимости коэффициента стоячей волны в линии  $\Gamma$  от относительной нагрузки резонатора  $\frac{P_{p-y}}{P_n}$  для исходной связи меньше критической — — расчет; ● — "холодные" измерения.

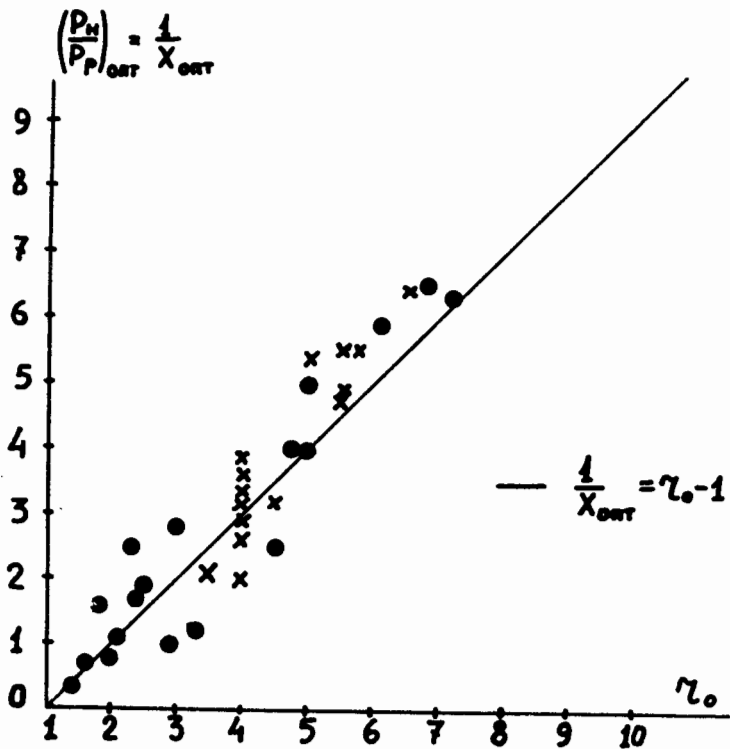


Рис. 4. Зависимость  $\left(\frac{P_H}{P_P}\right)_{opt} = \frac{1}{X_{opt}}$  от  $\gamma_0$ .  
 — — расчет; ● — "холодные" измерения; X — измерения на ускорителе.

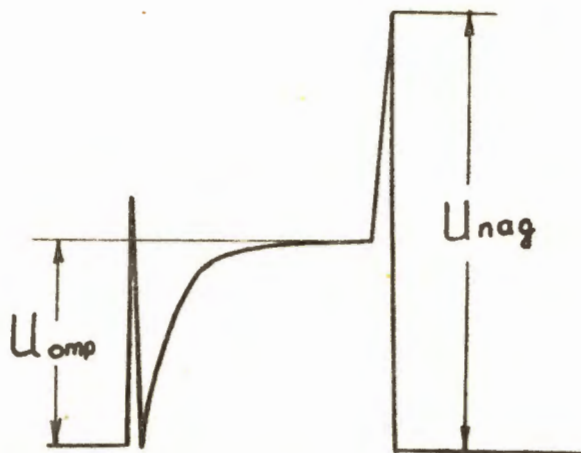


Рис. 5. Типовая осциллограмма отраженного от резонатора импульса.

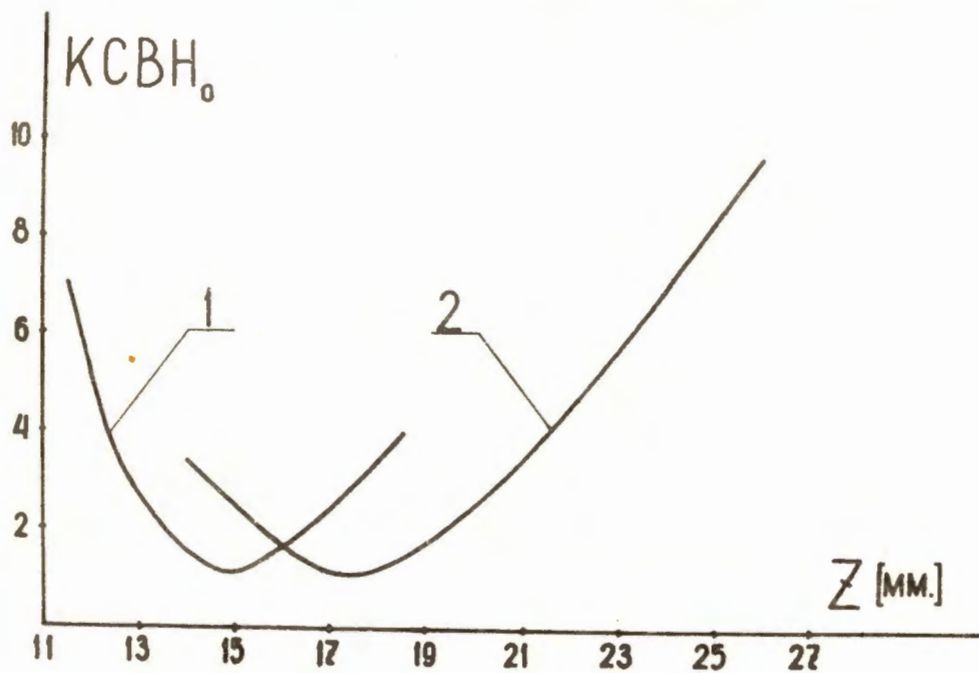


Рис. 6. Зависимость  $K_{СВН_0}$  в волноводной линии от ширины окна связи  $z$ .