

М-345

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна



9 - 3376

И.М. Матора, Р.В. Харьюзов, А.И. Гринберг

О СОГЛАСОВАНИИ В ВОЛНОВОДНОМ ТРАКТЕ,  
НАГРУЖЕННОМ  
НА УСКОРЯЮЩИЙ ОБЪЕМНЫЙ РЕЗОНАТОР  
СИЛЬНОТОЧНОГО МИКРОТРОНА

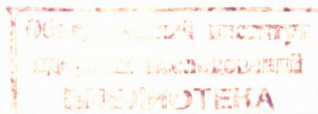
ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

1967.

9 - 3376

И.М. Матора, Р.В. Харьюзов, А.И. Гринберг

О СОГЛАСОВАНИИ В ВОЛНОВОДНОМ ТРАКТЕ,  
НАГРУЖЕННОМ  
НА УСКОРЯЮЩИЙ ОБЪЕМНЫЙ РЕЗОНАТОР  
СИЛЬНОТОЧНОГО МИКРОТРОНА



5225/2 пр.

## Введение

Условия работы резонатора микротрона, в котором импульсный ток ускоренных электронов составляет 50-100 ма, а энергия - 30 Мэв, существенно отличаются от условий в ускоряющей системе линейных электронных ускорителей. Особенно чётко это видно, если сравнить соотношение СВЧ мощностей, затрачиваемых на ускорение электронов (нагрузка) и на возбуждение необходимого поля в резонаторе (омические потери в его стенках). В случае линейного ускорителя отношение мощности в нагрузке к мощности потерь в стенках волновода, как известно, не превосходит единицы. Что касается микротрона, то это отношение составляет, например, в ускорителе ЛФЭ ОКЯУ  $1/6 \pm 10$ . Причиной столь резкого различия является то, что в противоположность линейному ускорителю, в микротроне нагрузка пучком имеет как бы параллельное включение, пучок в нём проходит через единственный ускоряющий зазор многократно. Вместе с тем мощность, затрачиваемая на возбуждение микротронного резонатора, невелика, т.к. размеры резонатора малы. Она составляет обычно 0,5-0,7 Мвт для резонаторов на длину волны 10 см. С другой стороны, даже без учёта потерь ускоренных электронов импульсная мощность в пучке 50-100 ма 30Мэв равна 1,5-5 Мвт, а с учётом потерь её следует по крайней мере удвоить. Такое соотношение между мощностями нагрузки и возбуждения резонатора существует во время нормальной работы, в те время как при пуске ускорителя имеет место и все промежуточные его значения, поскольку ток ускоренных электронов плавно увеличивается от нуля до номинальной величины.

В связи с этим задача согласования резонатора мощного микротрона с СВЧ трактом во все моменты пуска и работы ускорителя представляет определённые трудности. Это и побуждало выполнить описываемое исследование.

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

Прямоугольный (или цилиндрический) медный объёмный резонатор микротрона, предназначенный для работы в 10-сантиметровом диапазоне волн, был связан с волноводным трактом 72x34 мм прямоугольным окном связи, размеры которого должны были обеспечить согласование в режиме ускорения пучка электронов. 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 КСВН 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 ВММ-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 мер, исключающих такую утечку.

Баланс мощности в системе волновод-резонатор-измеритель можно представить в виде выражения

$$P = P_H + P_{отр} + P_o \quad (1)$$

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

$P_H$  - мощность нагрузки, отбираемая термистором,

$P_{отр}$  - отраженная мощность,

$P_o$  - мощность потерь в стенках резонатора (в неё же входит незначительная мощность, излучаемая резонатором через пролетные окна).

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

$$P_o = P - (P_H + P_{отр})$$

и отношение  $\frac{P_o}{P_H}$ , характеризующее степень нагрузки резонатора. На рис. 1 приведены экспериментальные зависимости КСВН от отношения  $\frac{P_o}{P_H}$ . Каждая кривая соответствует определенной ширине окна связи. По внешнему виду их можно разделить на две группы. В первую группу входят кривые 1, 2, 3, полученные при сравнительно малых размерах окна связи, т.е. при связи ненагруженного резонатора меньше критической<sup>1/2/</sup>. Здесь увеличение ширины окна связи ведет к снижению КСВН без нагрузки (обозначим его КСВН<sub>0</sub>), а увеличение нагрузки (уменьшение отношения  $\frac{P_o}{P_H}$ ) для данной ширины окна приводит к увеличению КСВН, т.е. ухудшению согласования.

Промежуточное положение занимает кривая 4, где КСВН не зависит от  $\frac{P_o}{P_H}$  при  $\frac{P_o}{P_H} > 6$ , а для значений  $\frac{P_o}{P_H} < 6$  КСВН резко возрастает. Эта кривая соответствует связи ненагруженного резонатора с волноводом, близкой к критической. Критическая связь может быть использована в устройствах с незначительной нагрузкой резонатора ( $\frac{P_o}{P_H} > 6$ ).

Во второй группе относятся кривые 5, 6, 7, 8, 9. Для них

1. КСВН<sub>0</sub> растет по мере увеличения ширины окна.

2. Для любой заданной ширины КСВН главным образом уменьшается при увеличении нагрузки и достигает минимума при определенной её величине. Каждому значению ширины окна соответствует вполне определенное значение ( $\frac{P_o}{P_H}$ ) в точке минимума КСВН.

Например, при  $b = 15,5$  мм ( $\frac{P_o}{P_H}$ )<sub>опт</sub> = 4,5; при  $b = 17,5$  мм ( $\frac{P_o}{P_H}$ )<sub>опт</sub> = 0,35.



3. КСВН при оптимальной нагрузке ( в минимуме ) практически не зависит от размера окна и близок к единице. Кривые 5,6,7,8,9 соответствуют связи ненагруженного резонатора с волноводом больше критической. Кривая 10 получена на действующем микротроне с цилиндрическим резонатором ( ширина окна связи - 21,5 мм).

По соображениям, приведенным во введении, в микротроне целесообразно реализовать лишь последний тип кривых. При этом выбор окна связи следует делать, учитывая следующие два противоречия друг другу фактора. С одной стороны, для повышения коэффициента полезного действия ускоряющей системы нужно стремиться к повышенным значениям  $(\frac{P_{H_0}}{P_0})$ . Но с другой стороны, как это следует из рис. 1, чем выше  $(\frac{P_{H_0}}{P_0})$  опт, 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 обстоятельство можно обойти, если заранее накалил катод в резонаторе до такой температуры, чтобы нагрузка эмитированным 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, т.к. 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 заданному  $(\frac{P_{H_0}}{P_0})$  опт.

С помощью кривых рис. 1 легко получить зависимость КСВН<sub>0</sub> резонатора от  $(\frac{P_{H_0}}{P_0})$  опт. Она изображена на рис. 2. 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, водяную нагрузку для отраженной от резонатора мощности и т.н. "балластную" водяную нагрузку. По разности температур охлаждающей воды на входе и выходе резонатора находилась рассеиваемая в нем мощность  $P_{рез}$ . Величина этой мощности зависит от потерь в стенках  $(P_0)$ , количества и энергии электронов, выбывших из ускорения и бомбардирующих резонатор  $(P'_H)$  и, наконец, от мощности подогрева катода, которая известна  $(P_{подогрева})$ .

Мощность потерь в стенках  $(P_0)$ , 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  $P'_H$  вычислялась как разность

$$P'_H = P_{рез} - (P_0 + P_{подогрева}).$$

Общая мощность электронной нагрузки  $P_H$  находилась суммированием  $P'_H$  и  $P''_H$ , где  $P''_H$  - произведение величины электронного тока на конечной орбите, ускоряющего напряжения и количества орбит. Кроме этого, с помощью осциллографирования огибающей импульса отраженной волны определялся КСВН в волноводе при любой степени нагрузки резонатора. По определению

$$K_{СВН} = \frac{U_{\text{пад}} + U_{\text{отр}}}{U_{\text{пад}} - U_{\text{отр}}}$$

где  $U_{\text{пад}}$  - напряжение падающей волны,  
 $U_{\text{отр}}$  - напряжение отраженной волны.

Значения  $U_{\text{пад}}$  и  $U_{\text{отр}}$  для любого отношения  $\frac{P_{\text{H}}}{P_0}$  были получены с приемлемой точностью из осциллограммы отраженного от резонатора импульса (рис.3) 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  $U_{\text{пад}}$ , т.к. длительность переходных процессов на фронтах импульса незначительна.

На рис.2 видна линейная зависимость между  $K_{СВН_0}$  и  $(\frac{P_{\text{H}}}{P_0})_{\text{опт}}$  начиная с  $(\frac{P_{\text{H}}}{P_0})_{\text{опт}} = 2,5$ ; при меньших значениях линейность не соблюдается, поскольку минимальное значение  $K_{СВН_0}$  равно единице, в то время как отношение  $\frac{P_{\text{H}}}{P_0}$  может быть ничтожно малым. Несмотря на различные условия, при которых проводились "холодные" измерения (неизменная мощность генератора и изменяющаяся в зависимости от нагрузки напряженность электрического СВЧ поля) и измерения на действующем ускорителе (неизменная напряженность СВЧ поля), наблюдается удовлетворительное совпадение результатов.

## 2. Зависимость $K_{СВН_0}$ от ширины окна связи резонатора

Измерения  $K_{СВН_0}$  в волноводе 72 x 34 мм с прямоугольным и цилиндрическим настроенными резонаторами ГС - сантиметрового диапазона на конце в зависимости от ширины окна связи дали результаты, приведенные на рис.4. Ход кривой для цилиндрического резонатора - более плавный вследствие того, что толща меди, в которой резервуруется окно связи, в нем к краям возрастает, тогда как в прямоугольном резонаторе она постоянна.

## 3. Заключение

Вышеизложенный материал лег в основу следующей простой методики выбора связи резонатора с волноводным трактом микротрона, которое эффективно применяется в ЛФЭ ОИЯИ в течение 3 лет.

По желаемому отношению  $(\frac{P_{\text{H}}}{P_0})_{\text{опт}}$  с помощью графика (рис. 2) определяется однозначное ему соответствующее значение  $K_{СВН_0}$ . Затем с помощью зависимости рис. 4 (связь большой критической) находится необходимая ширина окна связи. Проверка правильности такого выбора на "холодных" измерениях не требуется, т.к. ни в одном случае ошибок в выборе связи не было. Микротрон Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ был запущен в 1964 г., причем значение  $(\frac{P_{\text{H}}}{P_0})_{\text{опт}}$  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  $K_{СВН}$  был близок к значению  $(\frac{P_{\text{H}}}{P_0})_{\text{опт}}$  (правая ветвь кривых 5-9 рис. 1). Однако в дальнейшем выбирались все большие значения  $(\frac{P_{\text{H}}}{P_0})_{\text{опт}}$  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  $(\frac{P_{\text{H}}}{P_0})_{\text{опт}}$ .

В настоящее время рабочее значение  $(\frac{P_{\text{H}}}{P_0})_{\text{опт}}$  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)  $86,487\%$ . То, что в начальный период ввода резонатора в действие от него отражается около  $60\%$  всей мощности, не приводит к разрушительным последствиям, т.к. эта ситуация имеет место в течение лишь 15-30 минут пускового периода ускорителя после очередной сборки и нескольких секунд после каждой 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 вводимой мощности сопровождается улучшением согласования в волноводе и уменьшением КСВН вплоть до единицы.

В заключение мы хотим поблагодарить всех сотрудников ЛНФ, содействовавших выполнению работы.

#### Л и т е р а т у р а

1. В.Д.Ананьев и др. АЭ, 20, 106 (1966).
2. Э.Л.Гинзтон. Измерения на сантиметровых волнах. ИЛ, 1960.
3. И.М.Матора, Р.В.Харьзов. Волноводный тракт микротрона ЛНФ ОИЯИ на 30 Мэв, БИ-2737, Дубна, 1966.

Рукопись поступила в издательский отдел  
8 июня 1967 года.

КСВН

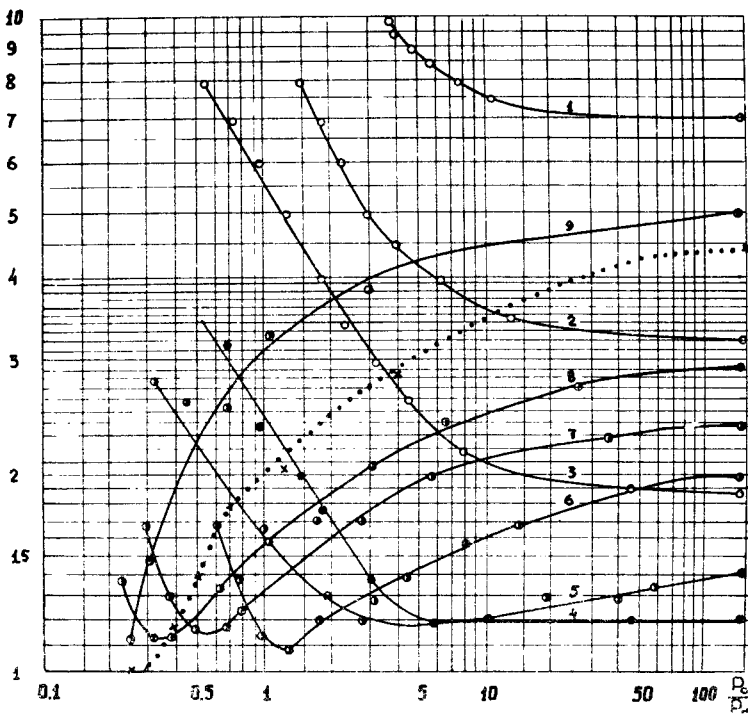


Рис. 1



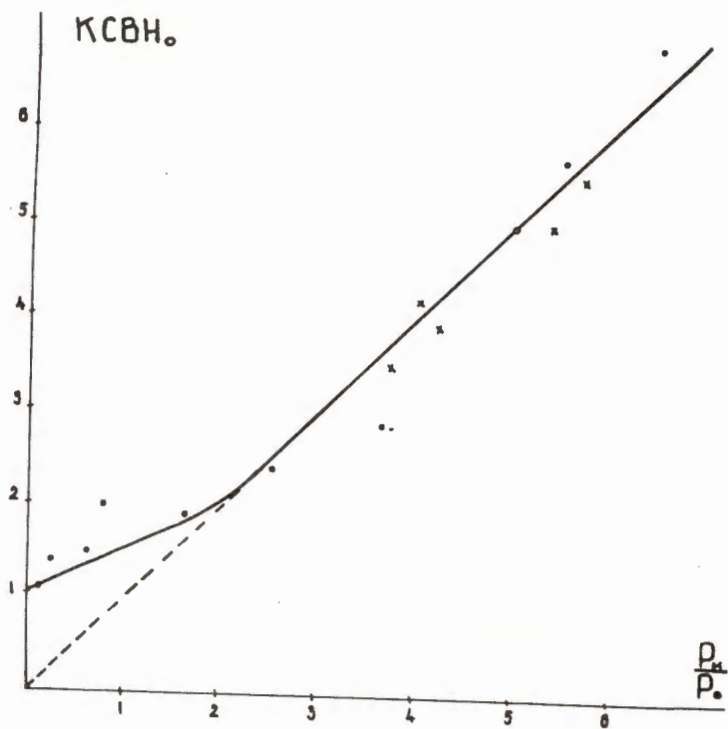


Рис. 2

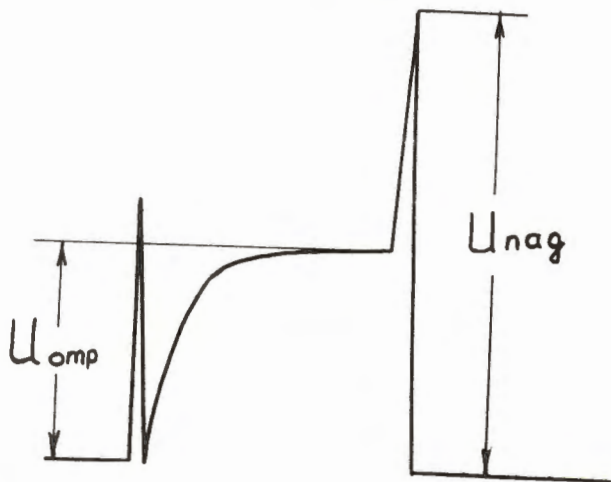


Рис. 3

01

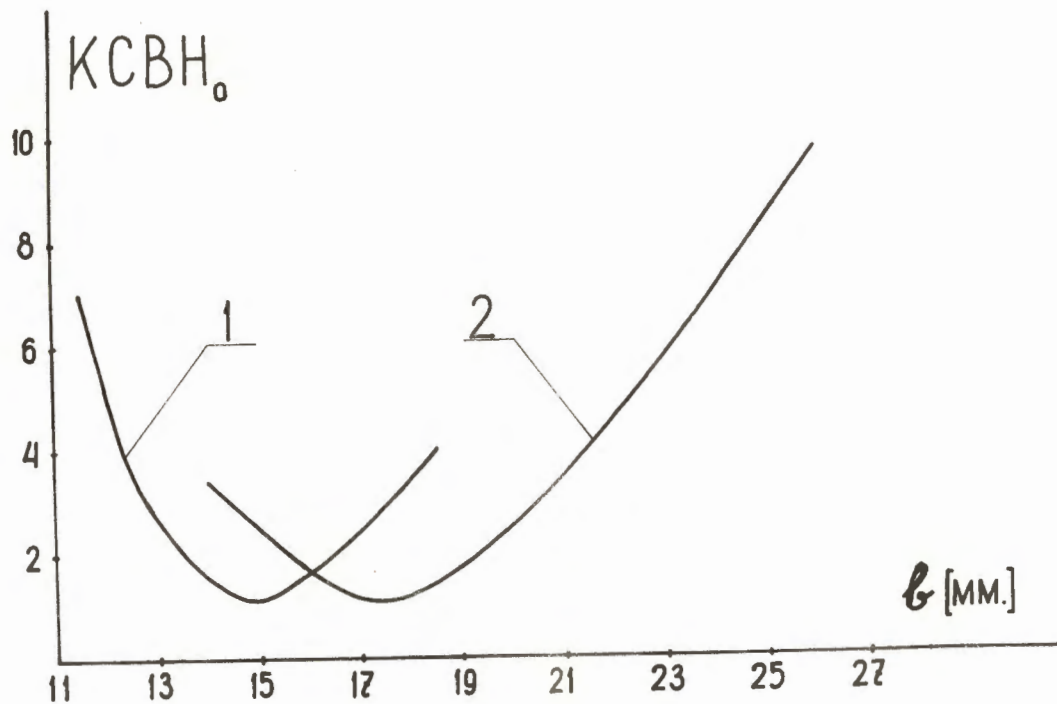


Рис. 4