

907



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория высоких энергий

Ю.Д. Безногих, Л.П. Зиновьев, Г.А. Иванов, В.И. Попов, В.П. Саранцев

907

**ВОЗБУЖДЕНИЕ РЕЗОНАТОРА
ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ
АВТОГЕНЕРАТОРОМ
С ГАСЯЩИМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ**

Дубна 1962 год

Ю.Д. Безногих, Л.П. Зиновьев, Г.А. Иванов, В.И. Попов, В.П. Саранцев

907

ВОЗБУЖДЕНИЕ РЕЗОНАТОРА
ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ
АВТОГЕНЕРАТОРОМ
С ГАСЯЩИМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

В в е д е н и е

Существует несколько способов получения необходимого уровня колебательной мощности в полном резонаторе протонного линейного ускорителя:

1. Использование предвозбудителей разных типов и основных автогенераторов.

Предвозбудитель начинает работать раньше основных генераторов. Он возбуждается на частоте резонатора и создает в нем уровень мощности, достаточный, во-первых, для прохождения области высокочастотного разряда, и, во-вторых, для захватывания на частоте резонатора основных генераторов, выполненных в виде автогенераторов без гасящих сопротивлений, в функцию которых входит доведение уровня поля в резонаторе до необходимой величины ^{/1/}.

Предварительное возбуждение может быть осуществлено различными методами: а) с помощью автогенератора со слабой докритической связью; б) генератором с независимым возбуждением; в) автогенератором с гасящим сопротивлением.

2. Возбуждение резонатора от задающего кварцованного автогенератора через усилители мощности ^{/2/}.

3. а) Возбуждение резонатора от нескольких автогенераторов с гасящим сопротивлением. (Ускоритель-инжектор ЛВЭ ОИЯИ). б) Возбуждение резонатора от одного автогенератора с гасящим сопротивлением. ^{х)}

В данной работе рассматриваются некоторые вопросы, связанные с возбуждением высокооборотного резонатора протонного линейного ускорителя от одного автогенератора с "гасящим" (антипаразитным) сопротивлением. В литературе сведений о работе подобных систем не имеется.

Автогенератор и система ввода мощности, описываемые в данной работе, служат для возбуждения полого резонатора протонного линейного ускорителя, используемого в качестве инжектора синхрофазотрона на 10 Бэв.

х) Последние два способа аналогичны. Разница заключается лишь в мощности генераторных ламп.

Приведем основные характеристики линейного ускорителя.

Энергия ускоренных протонов - 9,4 Мэв.

Частота ускоряющего поля - 143,5 Мгц.

Средняя амплитудная напряженность электрического поля по оси ускорителя - 18,3 Кв/см.

Полная длина резонатора - 6 м.

Диаметр вписанной окружности резонатора - 1,5 м (резонатор представляет собою правильный 16-гранник).

Добротность резонатора - $(50-60) \cdot 10^3$.

Активная мощность, необходимая для создания указанной напряженности электрического поля по оси ускорителя, составляет примерно 600 - 700 Квт/имп.

Линейный ускоритель работает в импульсном режиме с частотой 1 импульс за 15 секунд. Длительность импульса высокой частоты по столу составляет 400 - 500 мксек.

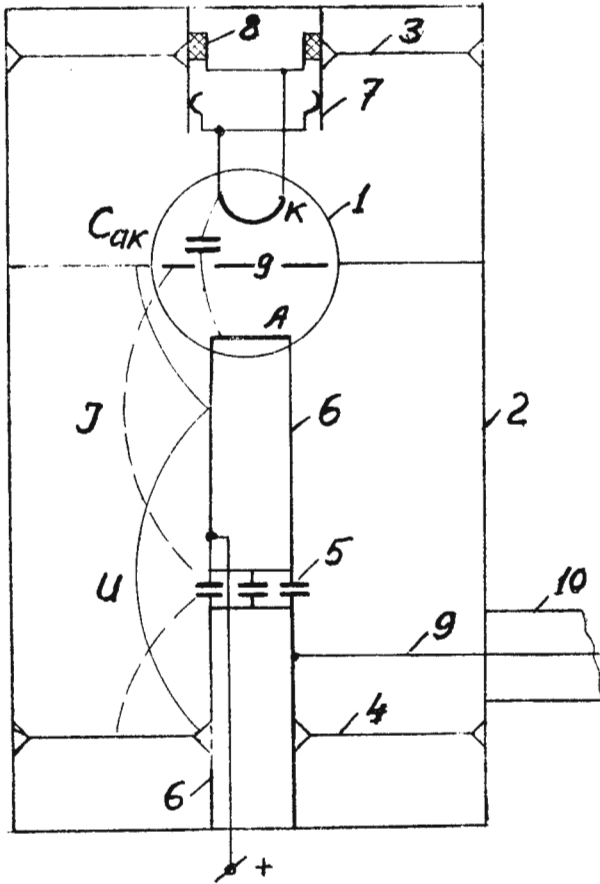
Высокочастотный генератор был сконструирован группой сотрудников радиотехнического отдела. Он представляет собой трехчетвертной автогенератор с заземленной сеткой на лампе ГИ-56. (См. рис. 1,2).

Работа генератора на эквивалентное сопротивление

С целью определения величины мощности, которую может дать генератор, была проверена его работа на эквивалентное сопротивление. Измерение отдаваемой мощности производилось калориметрическим способом. В качестве поглотителя мощности применялось содовое сопротивление, которое устанавливалось в конце измерительной линии длиной $\lambda/2$. (Схема измерения показана на рис. 3).

С помощью настроечного шлейфа и подбора величины сопротивления удалось получить максимум мощности в нагрузке. При этом волна в измерительной линии была близка к бегущей. Коэффициент бегущей волны (КБВ) равен 0,6 - 0,7.

Средняя мощность, выделяющаяся в нагрузке, вычислялась по формуле



- 1 - лампа ГИ-5Б
- 2 - анодно-катодный внешний цилиндр
- 3 - катодный плунжер
- 4 - анодный плунжер
- 5 - анодные блокировочные емкости
- 6 - анодный внутренний цилиндр
- 7 - катодный внутренний цилиндр
- 8 - катодная блокировочная емкость
- 9 - связь с внешней нагрузкой
- 10 - фидер
- $C_{ак}$ - емкость кольца обратной связи 9-13 пф.

Рис. 1.

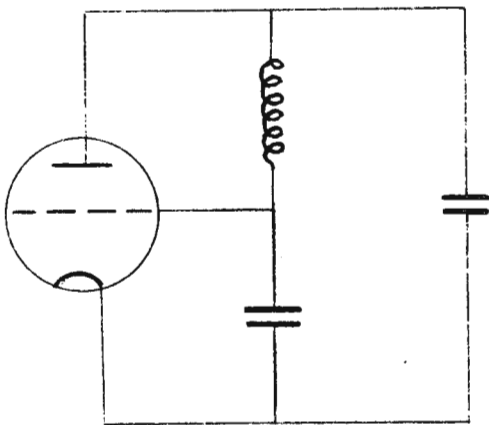


Рис. 2.

эквивалентная схема автогенератора

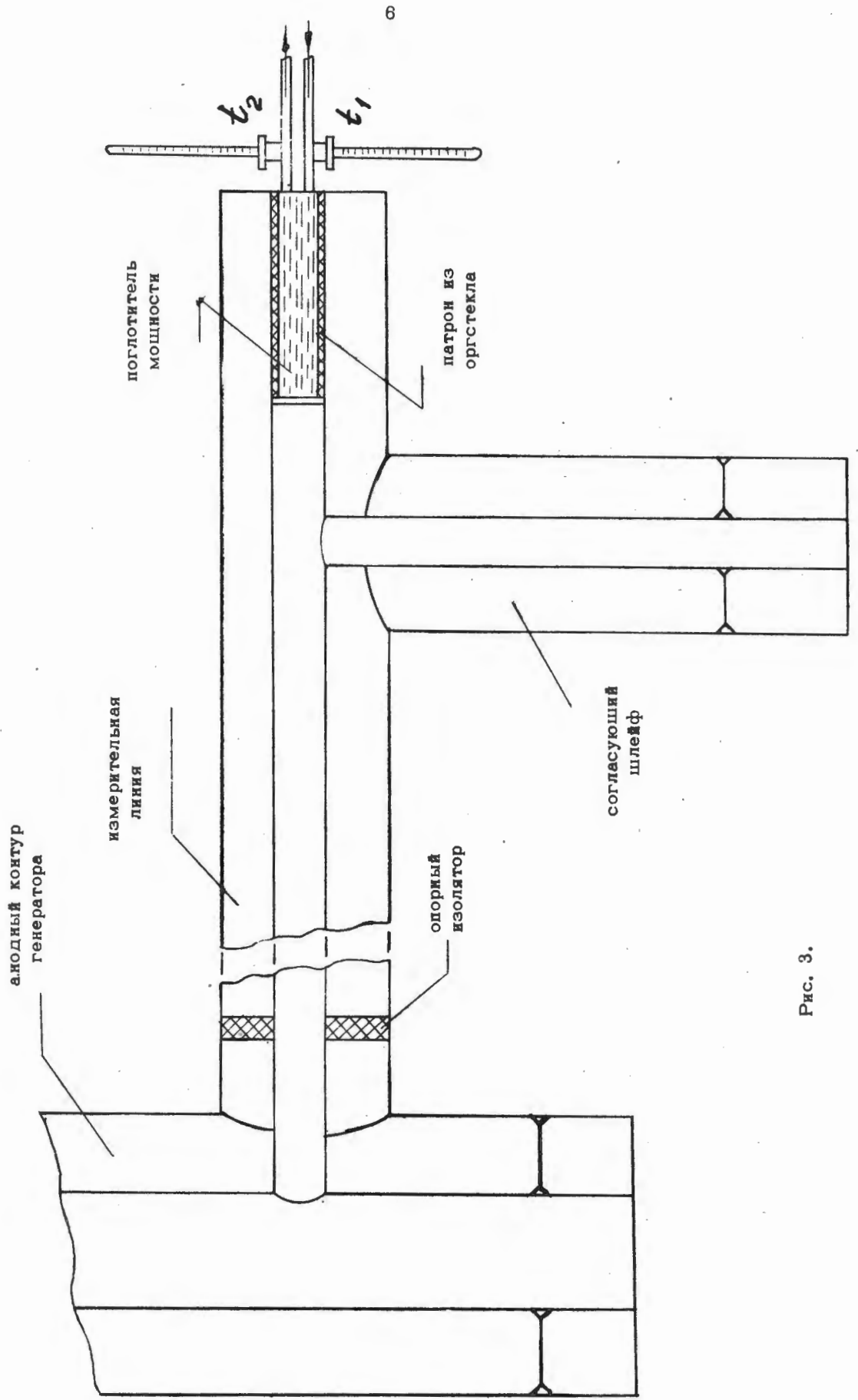


Рис. 3.

$$N = 4,18 w (t_2 - t_1) ,$$

где w - расход воды в нагрузке в $\frac{\Gamma}{\text{сек}}$, t_2 - температура выходящей воды в градусах, t_1 - температура входящей воды в градусах.

Мощность в импульсе вычисляется по формуле $P_{\text{имп}} = N S$, где S - скважность импульсов. При анодном напряжении $U_a = 24 \text{Кв}$,

$$\sigma = \frac{U_{\text{min}}}{U_{\text{max}}} \sim 0,6 - 0,7, \quad \tau_{\text{имп}} = 1 \text{ мсек}, \quad S = 2000$$

$$\text{получено } P_{\text{имп}} \approx 800 \text{ Квт.}$$

Измерений при номинальном напряжении 28-30 киловольт провести не удалось ввиду пробоев по изолятору линии. Ожидаемая мощность при номинальном напряжении 1,0-1,2 Мвт.

Схема получения устойчивых колебаний в нагрузке. Выбор петли связи фидер-резонатор

Для получения устойчивых колебаний на собственной частоте объемного резонатора использовалась система с параллельным подключением гасящего сопротивления R_r .

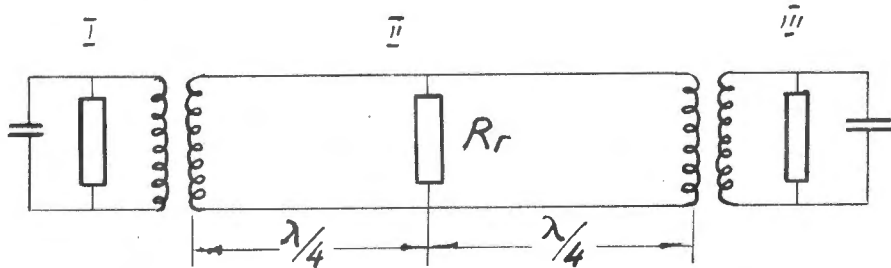


Рис. 4.

I - объемный контур автогенератора. II - линия связи (автогенератор-резонатор). III - объемный контур резонатора линейного ускорителя.

Длина линии связи равна половине длины волны возбуждаемых колебаний. В середине линии связи подключается гасящее сопротивление R_r . Конструктивно это подключение осуществлено с помощью четвертьволнового трансформатора

(рис. 5). В качестве R_r используется патрон из оргстекла, заполяемый проточным раствором соды (Na_2CO_3) необходимой концентрации.

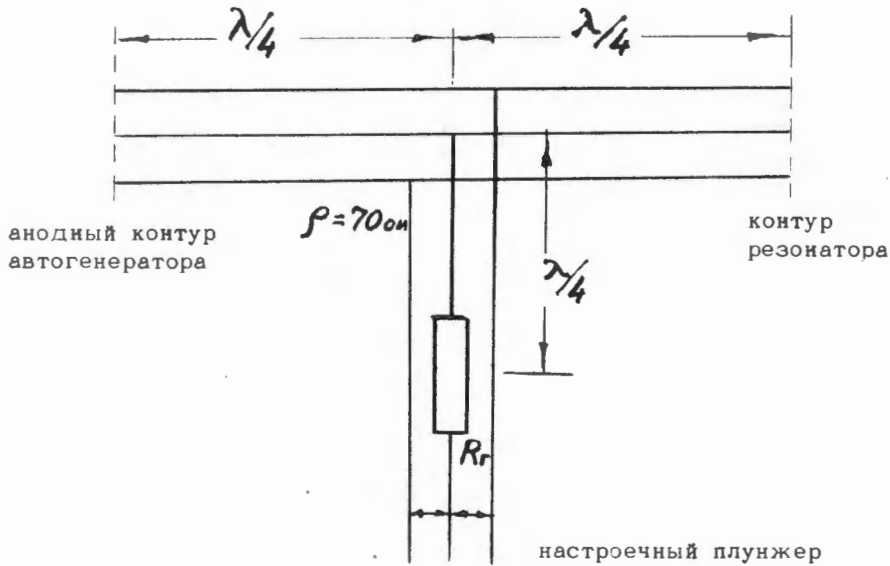


Рис. 5.

Волновое сопротивление линии связи и четвертьволнового трансформатора равно 0 ом.

Основные трудности при работе автогенератора на контур высокой добротности обусловлены, во-первых, необходимостью получения устойчивых колебаний системы на резонансной частоте резонатора и, во-вторых, значительным поглощением мощности в гасящем сопротивлении R_r (так как в данном случае задача заключается в получении необходимой колебательной мощности от одного автогенератора, то этот последний момент приобретает особое значение).

Указанные трудности преодолеваются рациональным выбором сопротивления R_r .

Требование получения устойчивых колебаний и поглощения минимума активной мощности в сопротивлении R_r противоречиво. Чем меньше мощности поглоща-

ется в гасящем сопротивлении R_r , тем менее устойчивыми становятся колебания системы на частоте резонатора.

Следующая трудность заключалась в выборе рациональной конструкции петли связи фидера с резонатором.

Основное требование, предъявляемое к петле связи - ее безиндуктивность на резонансной частоте.

Рассмотрим эквивалентную схему петли связи фидера с резонатором.

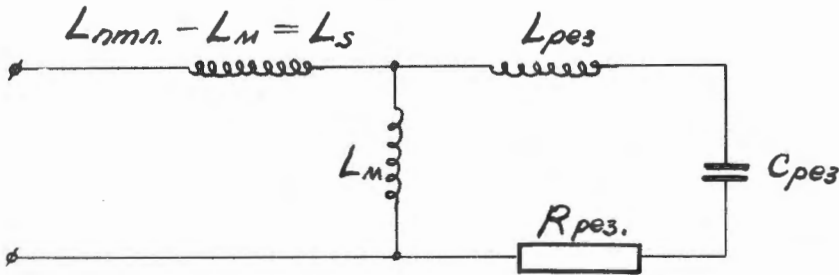


Рис. 6.

$L_{птл.}$ - индуктивность петли связи; L_M - взаимоиנדуктивность петли связи с резонатором; L_s - индуктивность рассеяния петли связи; $L_{рез.}$ - эквивалентная индуктивность резонатора; $C_{рез.}$ - эквивалентная емкость резонатора; $R_{рез.}$ - активное сопротивление резонатора (сопротивление потерь).

При резонансе входное сопротивление петли

$$Z_{вх} = j\omega L_{птл.} + \frac{\omega^2 L_M^2}{R_{рез.}}$$

Второе слагаемое определяет активную составляющую сопротивление петли, вносимую из контура резонатора при резонансе.

Желательно иметь такую конструкцию петли, чтобы второе слагаемое значительно превышало первое. Тогда входное сопротивление будет практически определяться его активной составляющей.

При слабой связи фидера с резонатором (мало L_M) вносимое активное сопротивление невелико; это может привести к тому, что фидер будет в основном нагружен на индуктивное сопротивление петли L_S .

Вводной изолятор фидера имеет диаметр внешней окружности $D = 200$ мм. Такой же диаметр в первоначальном варианте имел весь фидер, соединяющий генератор с резонатором.

Работа с фидером, имеющим диаметр 200 мм, показала, что:

1. Тип стоячей волны не меняется по длине фидера при изменении площади петли связи фидера с резонатором. Площадь петли связи ($S_{\text{птл.}}$) менялась в широких пределах от 0 до 100 см^2 , причем, при любом значении $S_{\text{птл.}}$ (в указанных пределах) стоячая волна по длине фидера имела следующий вид:

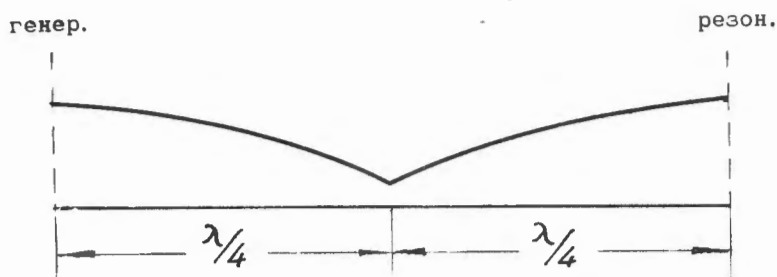


Рис. 7.

2. Коэффициент стоячей волны во всех случаях

$$\sigma = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = 10 - 40 .$$

Меньшие значения σ соответствуют большей площади петли, а большие значения σ — ее меньшей площади.

Эти данные говорят о том, что фидер имел слабую связь с резонатором и был нагружен в основном на индуктивное сопротивление петли. Даже при повышенном напряжении на аноде лампы ГИ-56, равном ~ 30 Кв ($U_H = 27$ Кв), удалось получить всего около половины колебательной мощности в резонаторе.

Механизм возбуждения высокочастотных колебаний в резонаторе вероятно можно объяснить следующим образом.

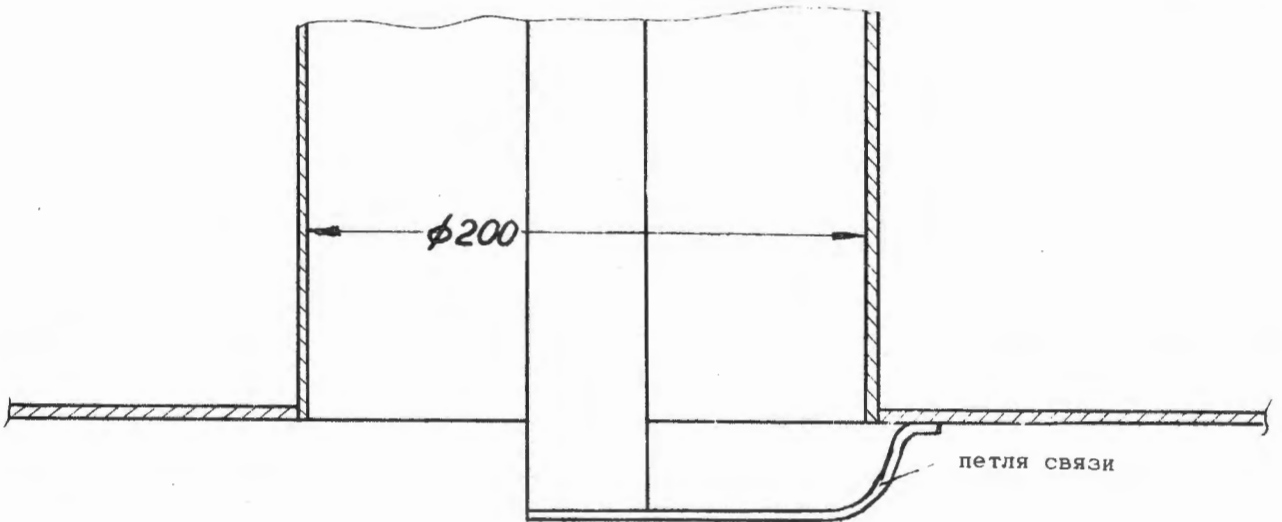
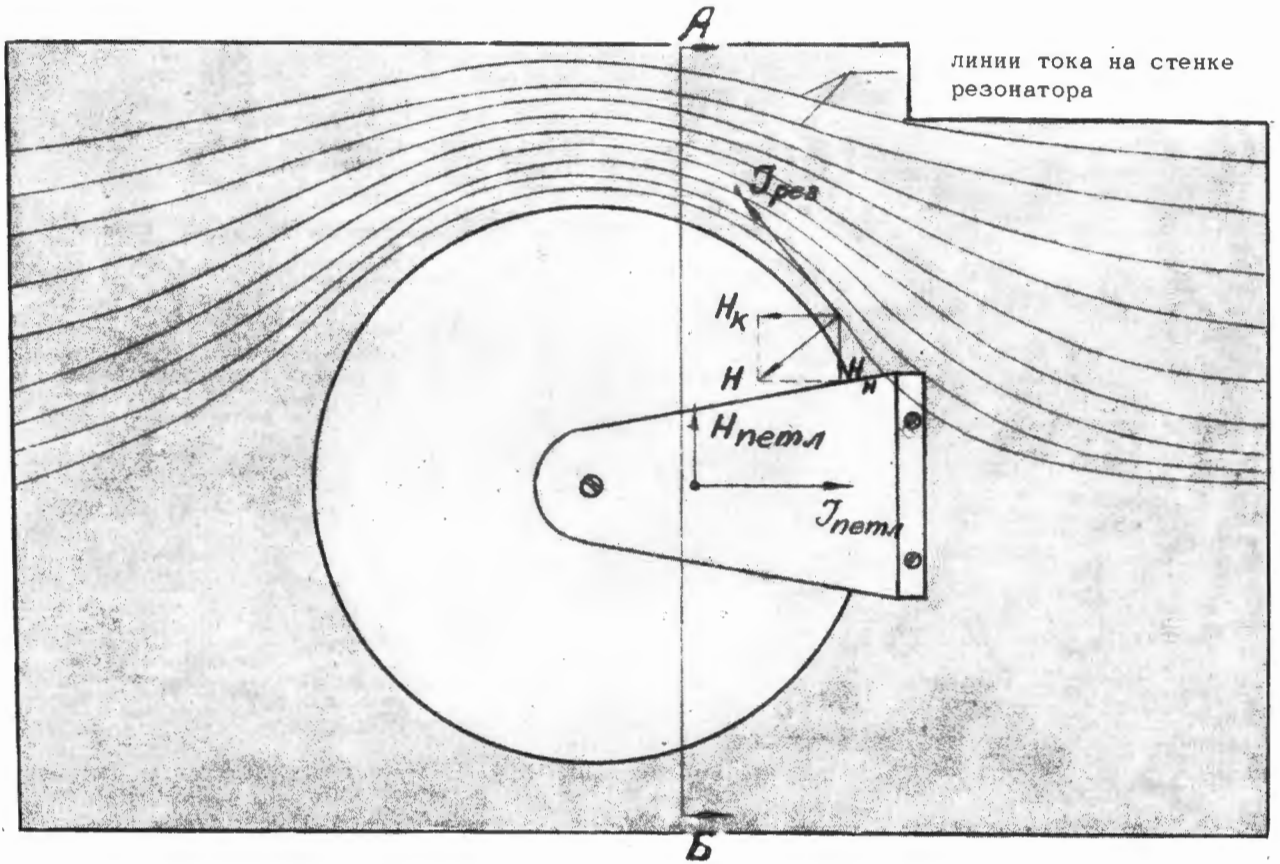


Рис. 8.

При первоначальном варианте конструкции фидера и петли, показанном на рисунке 8, имеет место случай слабой связи фидера с резонатором. В месте соединения фидера со стенкой резонатора отверстие в стенке вызывает в области петли значительные искажения линий тока (а, следовательно, связанных с ними линий магнитного потока), текущих вдоль образующих полового резонатора.

Из рисунка видно, что такие искажения магнитного поля приводят к тому, что площадь петли ориентирована не перпендикулярно к силовым линиям магнитного поля резонатора и, следовательно, эффективная площадь петли связи получается меньше площади, рассчитанной геометрически.

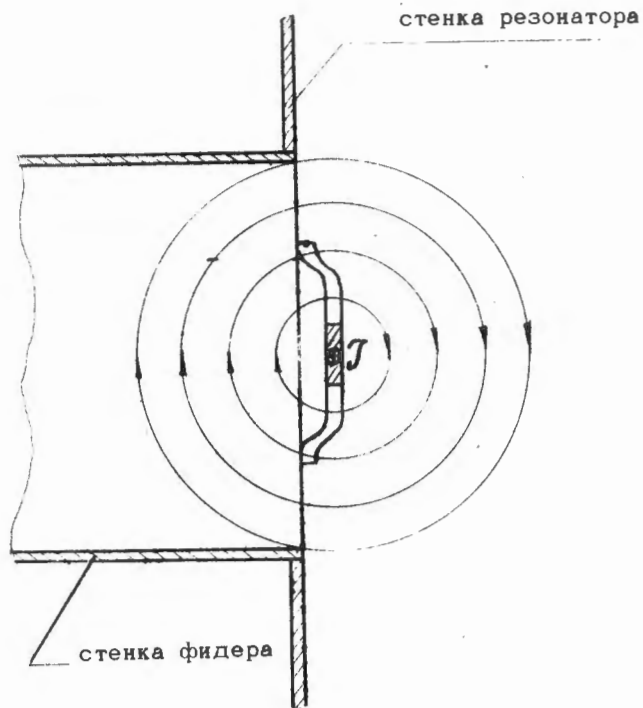


Рис. 9.

Кроме того, из рисунка 9 видно (дан разрез по сечению АБ рис. 8), что большая часть возбуждающего магнитного потока слабо связана со стенкой резонатора, что уменьшает поток взаимоиндукции и увеличивает поток рассеяния.

Для того, чтобы уменьшить искажения магнитного поля, диаметр фидера в месте его ввода в резонатор был уменьшен до 96 мм. У остальной части фидера был сохранен диаметр $D = 200$ мм. Таким образом, от стенки резонатора до изолятора был установлен переходной конус с волновым сопротивлением ~ 70 ом (см. рис. 10).

С целью улучшения откачки воздуха из объема конуса на его стенках были высверлены отверстия. Как показал опыт последующей работы, наличие указанных отверстий существенно ускоряет тренировку резонатора и уменьшает вероятность высокочастотных пробоев по изолятору со стороны вакуума.

Для выбора площади петли связи и ее конструкции генератор был включен в импульсном режиме на неоткачанный резонатор. Напряжение на анод лампы ГИ-56 подавалось такое, при котором в возбужденном резонаторе не возникало пробоев между трубками дрейфа. (Напряжение поднималось до 3,5-6 Кв).

В качестве гасящего сопротивления использовался содовый раствор определенной концентрации, который протекал через патрон из оргстекла. Патрон вставлялся в четвертьволновый шлейф, подключающийся к середине фидера, соединяющего генератор с резонатором.

На основании многочисленных экспериментов была определена оптимальная конструкция петли связи.

При площади петли $1,5 \times 17 \text{ см}^2$ сопротивление, вносимое из резонатора в фидер, получалось меньше волнового сопротивления фидера, а при площади петли связи $2 \times 17 \text{ см}^2$ и $2,5 \times 17 \text{ см}^2$ - соответственно больше волнового сопротивления.

Таким образом, для указанной конструкции ввода реактивность петли значительно меньше активного сопротивления, вносимого из резонатора в фидер на частоте резонатора, что и позволяет в зависимости от площади петли получать различные сопротивления $R_{\text{внос}}$

$$(R_{\text{вн.}} > \rho_{\text{фид.}} \quad R_{\text{вн.}} < \rho_{\text{фид.}}).$$

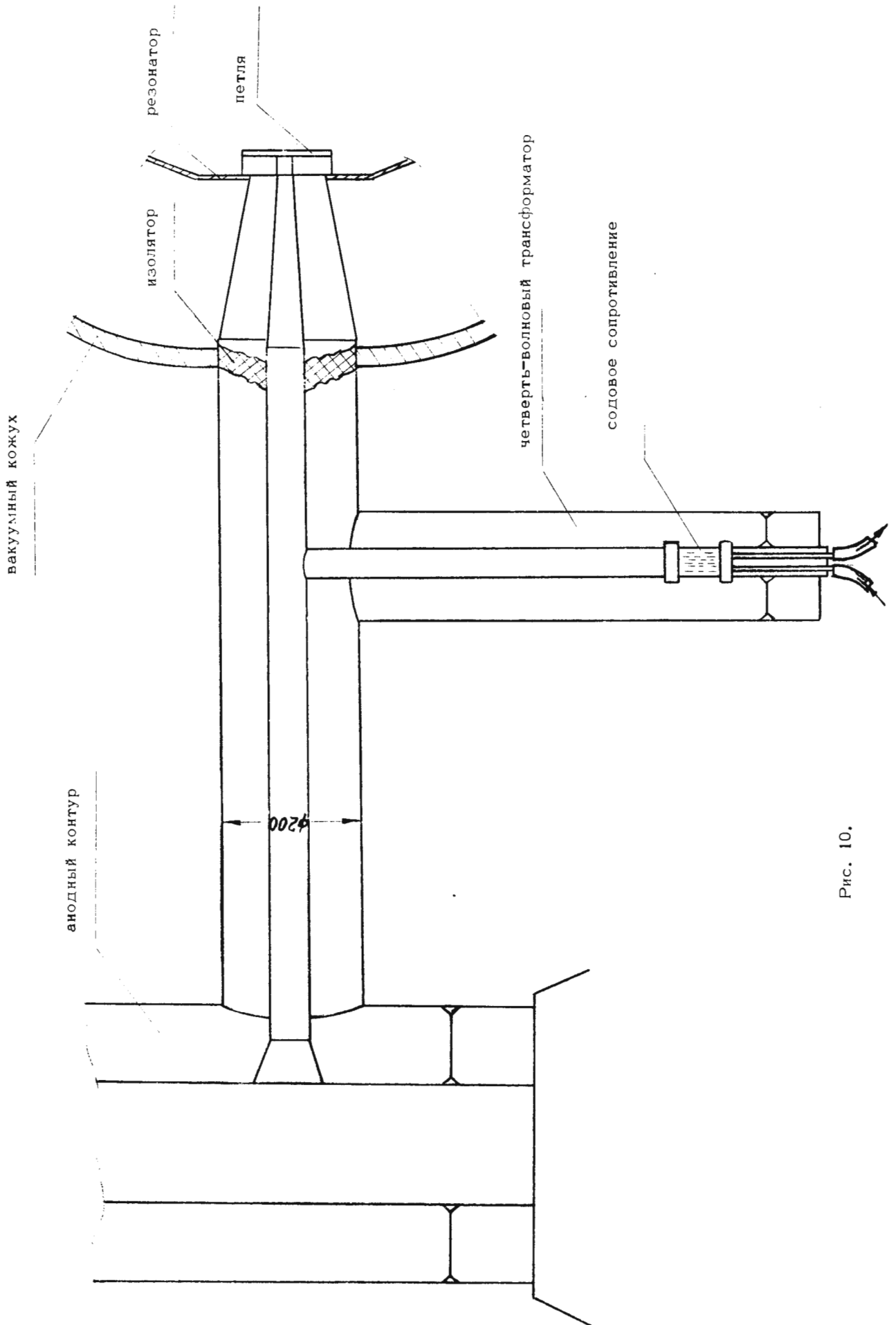


Рис. 10.

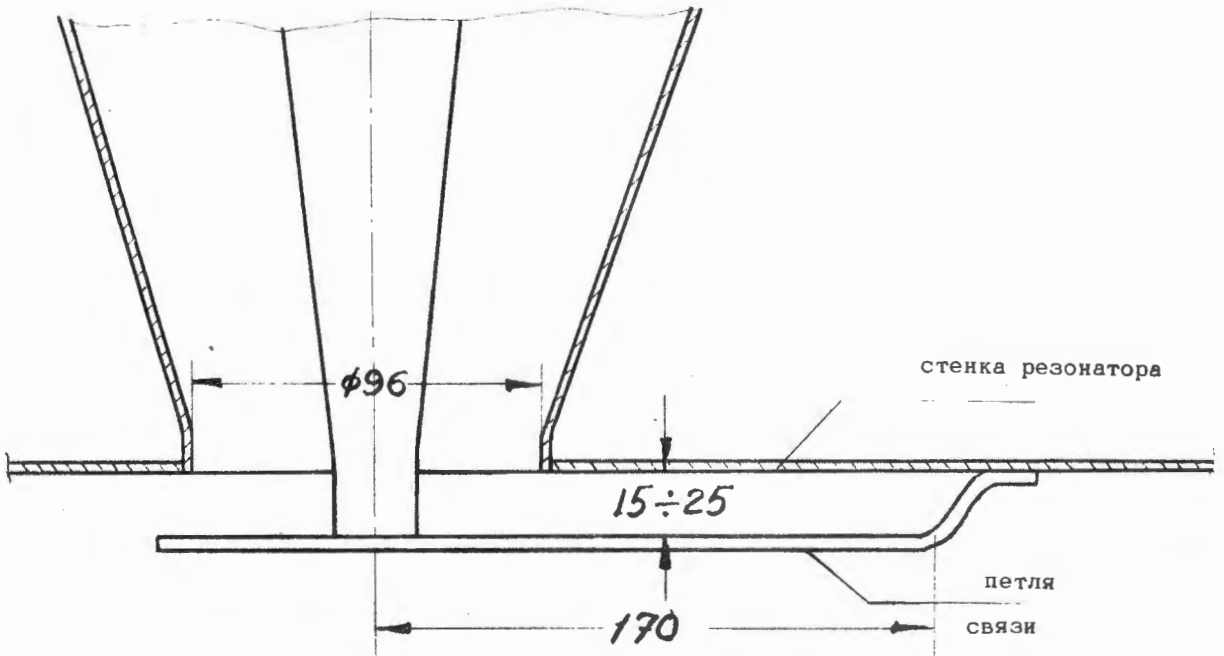
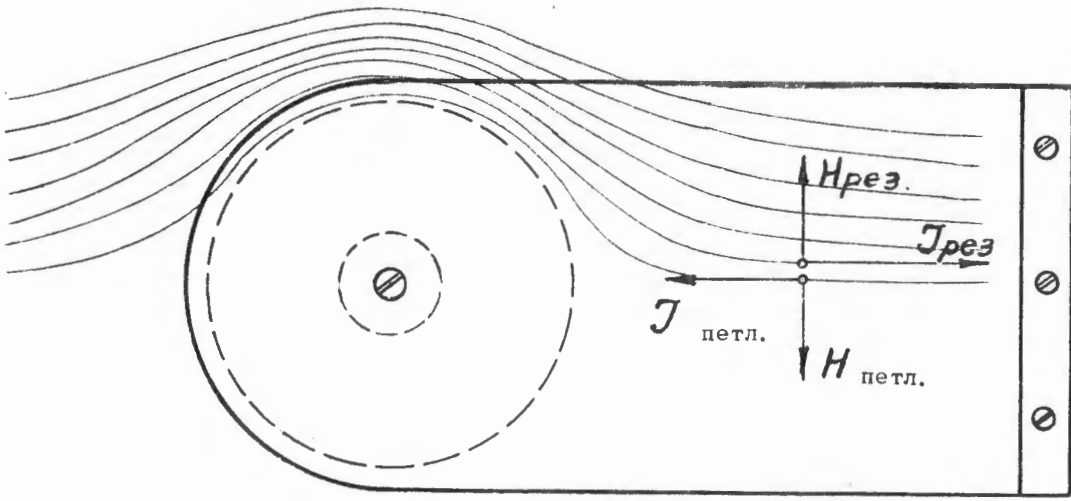


Рис. 11

В окончательном варианте была установлена петля $S_{\text{петл.}} = 17 \times 2,5 \text{ см}^2$. Длина фидера генератор-резонатор равна примерно $\lambda/2$. К середине фидера подключен четвертьволновый трансформатор с гасящим сопротивлением.

При импульсном напряжении на аноде генераторной лампы, равном 27-28 Кв, было получено номинальное значение напряженности электрического поля по оси резонатора в вакууме (18,3 Кв/см), что дало возможность получить ускоренный пучок протонов рабочих параметров на выходе линейного ускорителя.

Оптимальная величина гасящего сопротивления. Зависимость мощности, отдаваемой генератором в резонатор, от величины R_r

Для выяснения зависимости колебательной мощности в резонаторе и мощности потерь в гасящем сопротивлении в зависимости от величины R_r были сняты соответствующие кривые (см.рис.12).

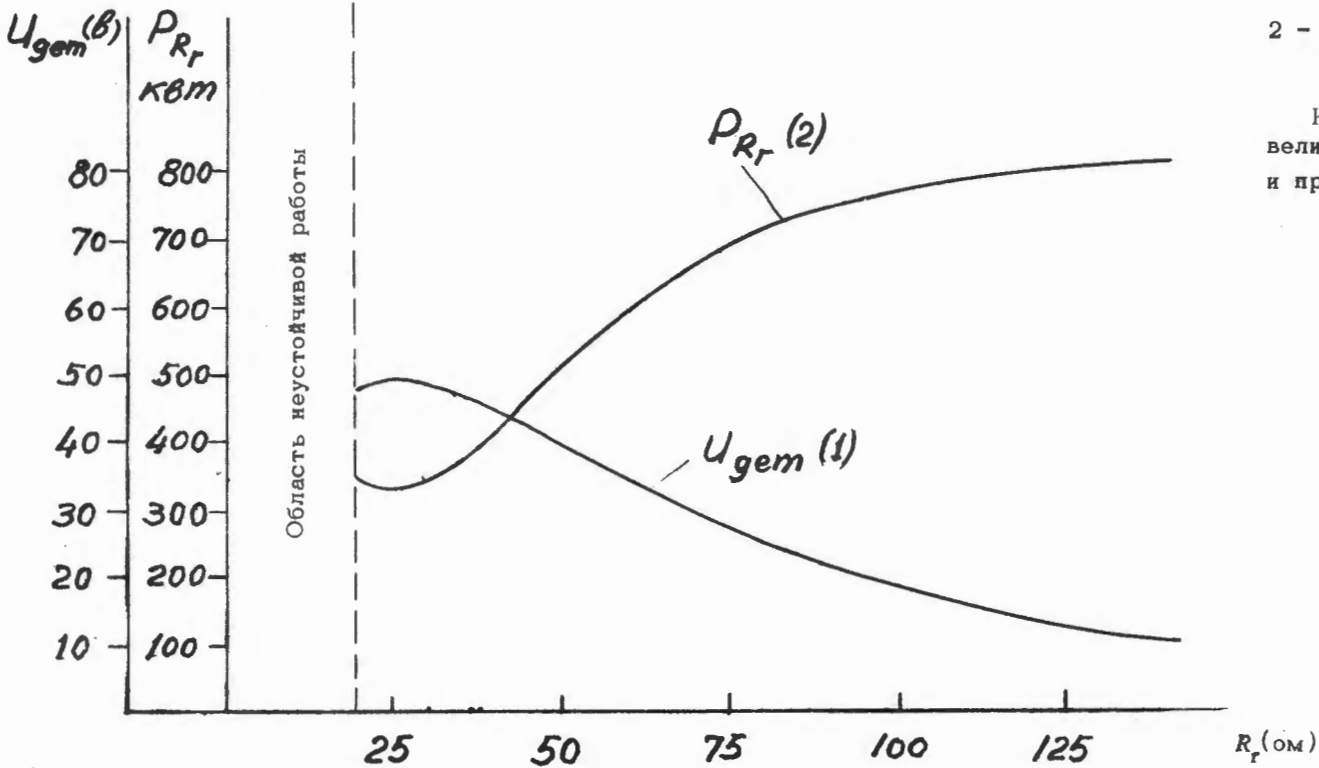
О величине колебательной мощности в резонаторе можно судить по величине протектированного высокочастотного импульса напряжения, снимаемого с контрольной петли, установленной в резонаторе (кривая 1). Площадь контрольной петли $S = 0,8 \text{ см}^2$. В рабочем режиме линейного ускорителя с нее снимается протектированный импульс порядка 120-130 в. (После детектора стоит делитель, который ослабляет импульс в два раза).

Потери в гасящем сопротивлении измерялись калориметрическим методом.

О величине гасящего сопротивления, которая изменялась регулированием концентрации содового раствора, можно было судить по коэффициенту стоячей волны напряжения вдоль четвертьволнового трансформатора, а также по непосредственному измерению с помощью амперметра и вольтметра на частоте 50 гц.

По оси x (рис. 12) отложена величина гасящего сопротивления в омах, пересчитанная в фидер в месте подключения четвертьволнового трансформатора.

Из графика видно, что максимум отдаваемой в резонатор мощности лежит



- 1 - кривая, характеризующая мощность в резонаторе.
- 2 - кривая мощности потерь в гасящем сопротивлении R_r

Кривые сняты при $U_a = 24$ кв, постоянной величине ($X_{св}$) связи генератора с фидером и при $S_{птл} = 2,5 \times 17 \text{ см}^2$

Пересчитано в место подключения трансформатора

рис. 12.

в области $R_r = 25-30$ ом. Это соответствует также минимуму потерь в R_r . При дальнейшем уменьшении величины R_r система начинает работать неустойчиво.

Следует отметить, что оптимальные значения величины гасящего сопротивления, полученные в данной работе, не согласуются с теоретически вычисленными величинами R_r работы^{/3/}.

Л и т е р а т у р а

1. Л.Альварец. Берклиевский протонный линейный ускоритель. Проблемы современной физики № 4 (1956).
2. E.Regenstreif. Le synchrotron a protons du CERN CERN 59-26. ch.V. (1959).
3. А.П.Федотов, Б.К.Шембель. К вопросу о возбуждении колебаний в высокодобротном объемном резонаторе от автогенератора. Радиотехника и электроника, т.1, вып. 12, 1474 (1956).

Рукопись поступила в издательский отдел
31 января 1962 года.