



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория ядерных проблем

А.А. Глазов, В.А. Кочкин, Л.М. Онищенко, Е. Швабе

1103

ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СИСТЕМА
ПРОТОННОГО УСКОРИТЕЛЯ
В ВИДЕ ОДИНОЧНОГО РЕЗОНАТОРА

Дубна, 1960 год

03

А.А. Глазов, В.А. Кочкин, Л.М. Онищенко, Е. Швабе

1103

ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СИСТЕМА
ПРОТОННОГО УСКОРИТЕЛЯ
В ВИДЕ ОДИНОЧНОГО РЕЗОНАТОРА

Дубна 1960 год

А н н о т а ц и я

В работе описана высокочастотная система протонного ускорителя в виде одиночного тороидального резонатора с уровнем высокочастотного напряжения между выступами в один миллион вольт. Приведены результаты расчета основной частоты и конфигурации поля тороидального резонатора. Дан анализ работы автогенератора, контуром которого является объемный резонатор.

A.A.Glasov, V.A.Kochkin, L.M.Onishchenko, J.Schwabe

HIGH FREQUENCY SYSTEM OF THE PROTON ACCELERATOR IN THE FORM OF A SINGLE RESONANT CAVITY

Abstract

The high frequency system of the proton accelerator is described which has a form of a toroidal resonant cavity with high frequency voltage 1 MeV across the resonator gap. The results of calculating the dominant mode and the field configuration of toroidal cavity resonator are given. The analysis of the oscillator, whose toroidal cavity resonator is a part of its resonance circuit, is presented.

Разработка протонного ускорителя в виде одиночного резонатора была осуществлена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований с целью выяснения возможности использования его в качестве инжектора модели кольцевого фазотрона со спиральной структурой магнитного поля^{/1/}. В связи с этим к устройству в целом были предъявлены требования компактности, обусловленной необходимостью размещения его внутри кольца ускорителя, простоты, надежности и удобства в эксплуатации. В свою очередь, проблема наиболее эффективного ускорения частиц обусловила специфические требования к резонатору-ускорителю.

В случае постоянства ускоряющего высокочастотного напряжения максимальная энергия частиц на выходе резонатора-ускорителя будет тем больше, чем меньше их угол пролета в ускоряющем зазоре. При заданной энергии частиц, поступающих из ионного источника в ускоритель, уменьшение угла пролета может быть достигнуто путем уменьшения произведения fd , где $2d$ - ширина ускоряющего зазора, f - рабочая частота резонатора - ускорителя.

Среди различных резонаторов наименьшее значение фактора fd при высокой добротности имеют тороидальные резонаторы, у которых $2d$ - расстояние между выступами. Наряду с этим тороидальные резонаторы легко перестраиваются путем изменения расстояния между выступами и удобно komponуются с системой возбуждения и ионным источником, который может быть размещен внутри выступа. Все это обусловило выбор в качестве резонатора-ускорителя тороидального резонатора. Минимальная величина зазора между выступами резонатора определяется допустимыми значениями напряженности электрического поля и уменьшение произведения fd может быть достигнуто понижением частоты путем увеличения размеров установки. Результатом компромисса между желанием уменьшить частоту, получить высокую добротность и сохранить приемлемые размеры является резонатор, показанный на рис. 1.

Подробный электродинамический расчет резонатора приведен в работе^{/2/}. Из расчета следует, что при выбранных размерах резонатора можно пренебречь вариацией электрического и магнитного полей вдоль z - координаты в зазоре между выступами и выражения для полей в областях I и II имеют следующий вид:

$$E_{z_1} = a_0 \frac{J_0(kr) N_0(kr_2) - N_0(kr) J_0(kr_2)}{J_0(kr_1) N_0(kr_2) - N_0(kr_1) J_0(kr_2)} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \frac{I_0(T_n r) K_0(T_n r_2) - K_0(T_n r) I_0(T_n r_2)}{I_0(T_n r_1) K_0(T_n r_2) - K_0(T_n r_1) I_0(T_n r_2)} \cos \frac{n\pi}{L} z \quad /1/$$

$$H_{\psi_1} = \frac{i}{\eta} \left[a_0 M_0(r) + k \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{T_n} M_n(r) \cos \frac{n\pi}{L} z \right]$$

/2/

$$E_{z_{II}} = C_0 J_0(kr) \quad /3/$$

$$H_{\psi_{II}} = \frac{i}{\eta} C_0 J_1(kr) \quad /4/$$

$$a_0 = \alpha C_0 J_0(kr_1) \quad /5/$$

$$a_n = \frac{2}{\pi} C_0 J_0(kr_1) \frac{\sin n \pi \alpha}{n} \quad /6/$$

$$M_0(r) = \frac{J_1(kr) N_0(kr_2) - N_1(kr) J_0(kr_2)}{J_0(kr_1) N_0(kr_2) - N_0(kr_1) J_0(kr_2)} \quad /7/$$

$$M_n(r) = \frac{I_1(T_n r) K_0(T_n r_2) + K_1(T_n r) I_0(T_n r_2)}{I_0(T_n r_1) K_0(T_n r_2) - K_0(T_n r_1) I_0(T_n r_2)}, \quad /8/$$

где $\alpha = d/L$, $\eta = 120 \pi \text{ Ом}$, $C_0 = \frac{U_p}{2d} \text{ в.м}^{-1}$, U_p - амплитуда напряжения между выступами, J, N, I, K - цилиндрические функции, $k = 2\pi/\lambda$ - волновое число, $T_n = \sqrt{(\frac{n\pi}{L})^2 - k^2}$.

Уравнение для определения частоты основного колебания записывается следующим образом:

$$C_0 J_1(kr_1) = c_0 M_0(r_1) + k \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{T_n} M_n(r_1) \frac{\sin n \pi \alpha}{n \pi \alpha} \quad /9/$$

Расчет по этой формуле, выполненный на электронной счетной машине, дал для k значение

$$k = 1,3211. \quad /10/$$

Конфигурация магнитного поля, рассчитанная на ЭСМ по формулам /1/ - /8/, показана на рис. 2,3.

Расчетные значения добротности Q и эквивалентного шунтового сопротивления R_w :

$$Q = 29000, \quad R_w = 2,78 \text{ Мом} \quad /11/$$

На основании приведенных выше соображений была разработана конструкция резонатора-ускорителя. Разрез резонатора показан на рис. 4. Один из выступов резонатора сделан подвижным. Привод осуществляется снаружи через скользящее уплотнение и редуктор. Для наблюдения за разрядами в стенке резонатора имеется окно, закрытое Plexiglasовой крышкой. Связь с генератором осуществляется через отверстие диаметром 170 мм, снабженное патрубком с фланцем. Стальной вакуумный кожух резонатора и стальные днища покрыты обшивкой, выполненной из 0,5 мм листовой меди. Выступы сделаны из медной трубы и с торцов хромированы.

Токовый переход от выступов к днищу осуществлен пайкой свинцовооловянным припоем из-за технологических трудностей, возникающих при пайке серебром. Резонатор снабжен тремя измерительными петлями: двумя на днище $S_1 = 8 \text{ см}^2$, $S_2 = 25 \text{ см}^2$ и одной на боковой стенке $S_3 = 2 \text{ см}^2$.

Откачка резонатора осуществляется с помощью вакуумного агрегата ВА-5-4 через систему отверстий, просверленных в обшивке. Все уплотнения в резонаторе и насосе выполнены из вакуумной резины. Рабочий вакуум $\sim 10^{-6}$ мм рт.ст.

После изготовления резонатора было проведено тщательное измерение его основной частоты, добротности и распределения магнитного поля вдоль радиуса в центральной плоскости / $z = 0$ /.

Возбуждение резонатора осуществлялось с торцевой петли $s = 8 \text{ см}^2$ генератором стандартных сигналов, сигнал которого усиливался распределенным усилителем. Частота измерялась пересчетным частотомером ЧЭ-1.

Экспериментальное значение k при $2d = 40 \text{ мм}$

$$k = 1,3279 \pm 0,083 \quad / \quad f = 63,36 \text{ мгц} / \quad /12/$$

Ошибка соответствует возможной неточности установки зазора между выступами.

Добротность резонатора измерялась по методу замещения RC цепью ^{/3,4/}, а также по времени установления колебаний при импульсном возбуждении. До полировки листов медного покрытия добротность резонатора оказалась равной 9000, после полировки - 14000. Большое расхождение с теоретическим значением обусловлено, главным образом, наличием несовершенных контактных токовых переходов между днищами и цилиндрической частью резонатора.

Распределение напряженности магнитного поля вдоль радиуса, измеренное с помощью круглой петли площадью $0,36 \text{ см}^2$, оказалось очень близким к теоретическому. Ввиду хорошего совпадения теоретических и экспериментальных результатов при определении k и распределения напряженности магнитного поля оказалось возможным использовать боковую петлю для измерения абсолютных значений напряжения между выступами резонатора

$$U_{\text{петли}} = -i \omega \mu H_{\psi} S_p, \quad /13/$$

где

$$H_{\psi/z=0, r=r_2} = i 3,27 \cdot 10^{-3} U_p \text{ ам}^{-1}. \quad /14/$$

Ускоряющее высокочастотное поле может быть возбуждено в резонаторе различными способами ^{/5-10/}. Для создания ускоряющего высокочастотного поля в резонаторе-ускорителе используется автогенератор, единственным контуром которого на рабочей частоте является резонатор. Это обусловило компактность и простоту схемы по сравнению с многокаскадным генератором, отсутствие согласующих устройств, которые, как правило, потребляют мощность, простоту изготовления и эксплуатации. Требование получения максимальной мощности при простоте конструкции являлось доминирующим при выборе ВЧ питания резонатора, так как при возможном увеличении значения магнитного поля модели кольцевого фазотрона на радиусе инжекции потребовалось бы значительное увеличение напряжения резонатора-ускорителя. В связи с этим в конструкции генератора была предусмотрена возможность быстрого увеличения мощности путем перехода на двухламповую схему. Последнее обстоятельство обусловило размещение деталей генератора в шкафу и отказ от коаксиальной конструкции контуров.

Для получения мощности порядка 1 Мвт при длительности импульса около 150 мксек в генераторе используется триод ГИ-4А в схеме с заземленной сеткой.

Результаты расчета генератора на номинальную мощность вблизи критического режима приведены в таблице 1.

Таблица 1

E_c	U_c	I_{m_a}	I_{a_1}	I_{a_0}	I_{c_1}	I_c	R_{oe}	R_o	P_{oa}
Кв	Кв	а	а	а	а	а	ом	ом	Мвт
30	4,2	178	89	56,9	54,2	33,9	304	528	1,7

Принципиальная схема генератора показана на рис. 5. Анодный контур генератора, включающий емкость ламп, индуктивность, обусловленную элементами, расположенными внутри шкафа генератора, участок фидера между шкафом и резонатором и собственно резонатор, представляет собой сложную колебательную систему, которая должна резонировать на частоте параллельного резонанса f_a , близкой к частоте резонатора f_p , причем резонатор должен являться основным элементом, определяющим характеристики контура.

Импеданс, вносимый из резонатора в фидер,

$$Z_1 = \frac{r}{r^2 + X_{пр}^2} X_{св}^2 - i \frac{X_{пр}}{r^2 + X_{пр}^2} X_{св}^2, \quad /15/$$

где $X_{пр} = \omega L - 1/\omega C$, L и C - эквивалентные емкость и индуктивность резонатора на основной частоте, r - сопротивление потерь резонатора, отнесенное к пучности тока. Если считать, что импеданс Z_1 трансформируется к лампе через фидер без потерь с длиной ℓ и волновым сопротивлением Z_0 , то

$$Z = Z_1 \frac{1 + i \frac{Z_0}{Z_1} \operatorname{tg} \frac{2\pi \ell}{\lambda}}{1 + i \frac{Z_1}{Z_0} \operatorname{tg} \frac{2\pi \ell}{\lambda}}. \quad /16/$$

При $\ell = (2n+1) \frac{\lambda}{4}$, $n = 1, 2, 3 \dots$

/16/ ведет себя аналогично последовательно-резонансному контуру, на собственной частоте которого не может работать автогенератор. В случае $\ell = 2n \frac{\lambda}{4}$, $Z = Z_1$, причем импеданс Z_1 ведет себя подобно импедансу параллельного контура и, следовательно, возможна устойчивая работа автогенератора на частоте, близкой к частоте резонатора. Наличие C_r и L_r /емкость C_{ao} и индуктивность в шкафу генератора/ приводит к тому, что минимум напряжения в линии имеет место внутри шкафа вблизи анодов ламп, и настройка на полуволновую моду колебаний /на частоте резонатора/ осуществляется при геометрической длине фидера, значительно меньшей $\lambda/2$. Для того, чтобы еще уменьшить длину фидера, в генераторе применена кондуктивная связь с

резонатором. При этом настройка на $\lambda/2$ моду колебаний /фидер не подсоединен к выступу, резонатор открыт/ имеет место при длине фидера 30 см / $Z_0 = 88 \text{ ом}$ /.

Для того, чтобы избежать дополнительного ВЧ ввода в вакуумный объем и громоздкой системы фидеров, в генераторе резонатора-ускорителя применена внутренняя обратная связь с помощью емкости $C_{ак}$, которая конструктивно сделана легко сменяемой для удобства подбора оптимального значения при настройке и регулировке генератора. Тонкая регулировка обратной связи осуществляется с помощью катодного шлейфа, привод которого выведен наружу. Использование внутренней обратной связи при работе с объемным резонатором высокой добротности является одной из особенностей генератора. Величина емкости обратной связи определяется из соотношения:

$$C_0 = C_{ак} = \frac{U_{ок}}{U_{ак}} C_{ок} \left[1 - \left(\frac{f_k}{f} \right)^2 \right], \quad /17/$$

где f_k - частота катодного контура, f - рабочая частота.

$$f^2 = \frac{f_I^2 + f_{II}^2}{2} + \frac{f_I^2 - f_{II}^2}{2} \left[1 + \frac{4f_I^2 f_{II}^2 \kappa^2}{(f_I^2 - f_{II}^2)^2} \right]^{1/2} \quad /18/$$

$$f_I = (2\pi)^{-1} \left[L_a C_a \left(1 + \frac{C_0 C_k}{C_a (C_0 + C_k)} \right) \right]^{-1/2} \quad /19/$$

$$f_{II} = (2\pi)^{-1} \left[L_k C_k \left(1 + \frac{C_0 C_a}{C_k (C_0 + C_a)} \right) \right]^{-1/2} \quad /20/$$

$$\kappa^2 = \frac{C_0^2}{(C_0 + C_k)(C_0 + C_a)}, \quad /21/$$

где для краткости $C_{ок}$ и $C_{оа}$ обозначены как C_k и C_a , соответственно.

В рассматриваемом случае $f_k < 40$ МГц, коэффициент обратной связи критического режима $k_{обр.} = 0,14$, $f_a = 60$ МГц. При этом

$$C_0 / C_k \approx 0,1, \quad \frac{4f_I^2 f_{II}^2 \kappa^2}{(f_I^2 - f_{II}^2)^2} \ll 1 \quad /22/$$

$$f^2 = f_a^2 \frac{1 + \frac{C_0}{C_k}}{1 + \frac{C_0 + C_0}{C_k} + \frac{C_0}{C_a}} \left[1 + \frac{(f_k/f_a)^2 \frac{C_0^2}{C_a C_k (1 + C_0/C_k)^2}}{1 - \frac{(f_k)^2}{f_a^2} \frac{1 + C_0/C_a}{1 + C_0/C_k}} \right] \quad /23/$$

Так как $C_k \approx C_a$, из /23/ следует, что генерируемая частота очень близка к частоте анодного контура.

Необходимый режим работы генератора / $f = f_p$, $R_{oe} = R_{oe \text{ опт.}}$ / обеспечивается выбором волнового сопротивления фидера связи и местом подключения центральной жилы фидера к выступу резонатора. При этом совместно имеют место:

- 1/ полуволновый резонанс разомкнутого фидера на частоте резонатора,
- 2/ необходимое соотношение между U_a и U_p

$$\frac{U_a}{U_p} = \sqrt{\frac{R_{oe}}{R}} = \frac{1}{50} \quad (Q = 9000) . \quad /24/$$

Коэффициент полезного действия системы связи генератора с резонатором можно оценить, предполагая, что $I = I_{\text{max}} = \text{Const}$ и потери в системе равны потерям в коаксиальной линии, идентичной с анодным фидером, но с длиной, равной расстоянию от анода до выступа резонатора. В этом предположении $r_{\text{пот}} / r_{\text{рез}} < 0,01$, где сопротивления отнесены к пучности тока, и, следовательно, КПД системы связи близок к 100%.

При работе генераторов с эвакуированными объемными контурами встречаются специфические трудности, обусловленные возникновением разрядных явлений в объемах ^{/8,7/}. В рассматриваемом случае наибольшую опасность представляет резонансный высокочастотный разряд между выступами резонатора ^{/11/}. При существующих значениях fd уровень возникновения разряда лежит при напряжениях порядка сотни вольт. Загружая пространство между выступами, разряд резко портит характеристики резонатора и препятствует дальнейшему повышению напряжения. Разряд преодолевается только при импульсной работе генератора. В этом случае его влияние сказывается на задержке возникновения высоких уровней генерации по отношению к началу анодного модулирующего импульса и в "пропусках" генерации, когда высокие уровни ВЧ поля в резонаторе вообще не возникают. Разряд, обусловленный E_r и E_z компонентами поля в области 1, ограничивает рабочее напряжение в резонаторе на уровне порядка 10 Кв. Его действие наиболее сильно сказывается при оптимальной настройке генератора. Трудности, связанные с установлением высоких уровней напряжения в эвакуированном резонаторе высокой добротности, питаемом автогенератором, могут быть в значительной мере уменьшены, если с помощью вспомогательного устройства перед началом работы основного генератора установить в резонаторе колебания рабочей частоты с уровнем напряжения, превышающим уровень резонансного высокочастотного разряда между выступами. С целью создания такого "предвозбуждения" был изготовлен четырехкаскадный высокочастотный генератор с выходной мощностью порядка 500 вт. Схема генератора показана на рис. 6,7. Задающий генератор собран по двухтактной схеме на лампе ГУ-32 с контурами в виде двухпроводной линии. Генератор оформлен в виде отдельного блока и имеет автономное питание от стабилизированного выпрямителя. После часового прогрева нестабильность частоты генератора $\frac{\Delta f}{f} = 2.10^{-5}$ в час.

Импульсная работа генератора осуществляется с помощью модуляции по сетке лампы 6П9. В качестве модулятора используется генератор импульсов ГИС-2М, который служит одновременно синхронизатором всей установки. Связь с резонатором осуществляется с помощью торцевой петли, площадью 8 см². Для защиты от перенапряжений, возникающих при работе основного генератора, в цепь связи с резонатором включен искровой разрядник.

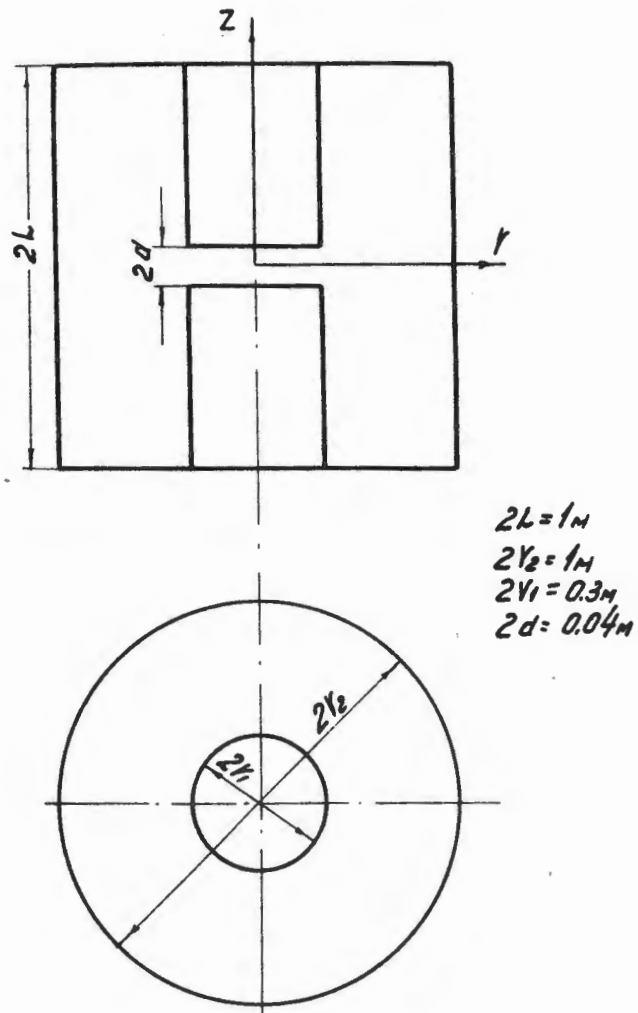
Импульсное питание ВЧ генератора осуществляется с помощью модулятора, собранного по схеме с искусственной линией, импульсным трансформатором и разрядником на мягких лампах. В качестве разрядника используются два тиратрона ТР1-40/15, включенные параллельно. Поджиг тиратронов осуществляется с помощью схемы запуска, вырабатывающей поджигающий прямоугольный импульс длительностью 5 мксек и амплитудой 300 в на сопротивлении 150 ом.

Контроль за импульсной работой генератора осуществляется с помощью двухлучевого осциллографа, на котором наблюдаются анодный импульс и импульс тока во вторичной обмотке анодного импульсного трансформатора. Высокочастотное напряжение подается с измерительной петли резонатора по 150-омному кабелю, нагруженному на сопротивление, равное волновому, непосредственно на пластины специально разработанного осциллографа. Измерение напряжения осуществляется путем сравнения его с постоянным напряжением. При напряжении на аноде лампы в 22 Кв, амплитуда высокочастотного напряжения между выступами резонатора достигает миллиона вольт. Общий вид установки со стороны резонатора показан на фотографии рис. 8. На переднем плане виден генератор предвозбуждения.

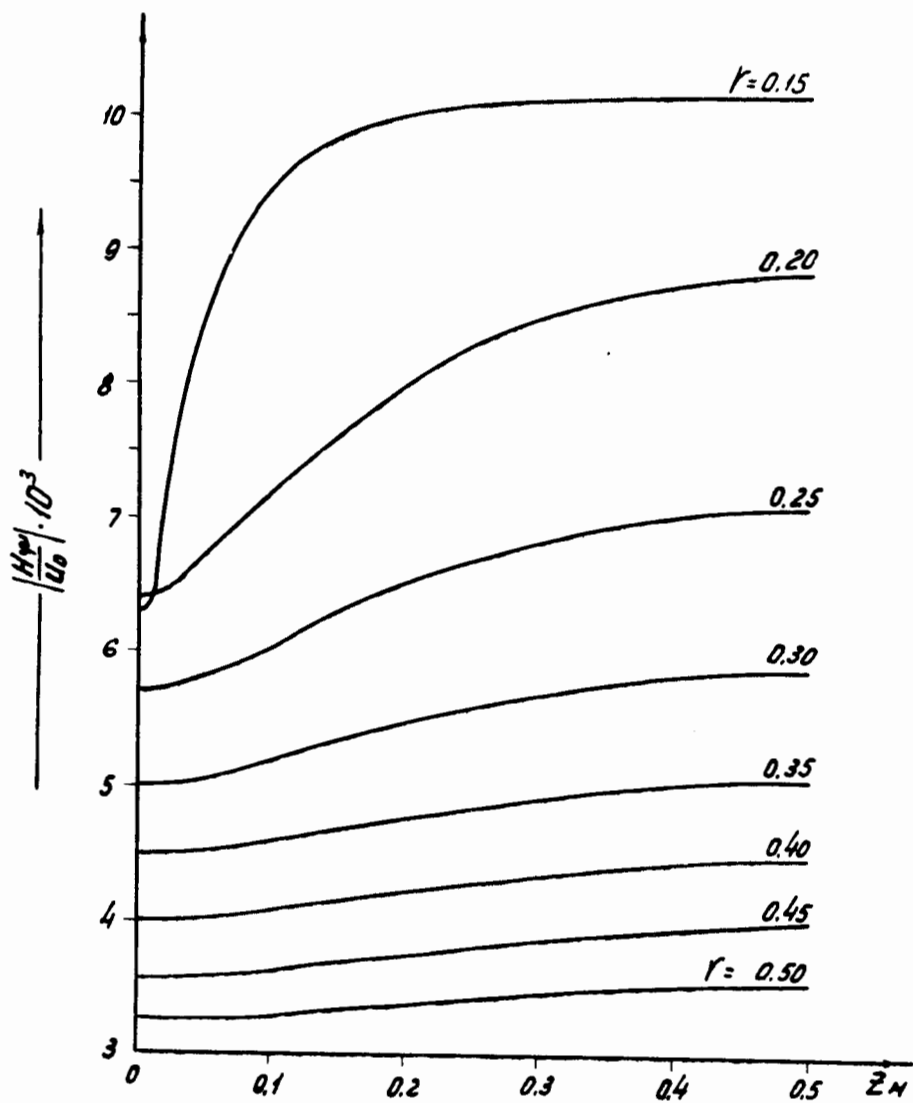
Л и т е р а т у р а

1. Д.П. Василевская, А.А. Глазов, Ю.Н. Денисов, В.П. Джелепов, В.П. Дмитриевский, Б.И. Замолотчиков, Н.Л. Заплатин, В.В. Кольга, А.А. Кропин, М. Кузмяк, Л.М. Онищенко, В.С. Рыбалко, Л.А. Саркисян, Ю. Швабе. Препринт ОИЯИ, Р-930 /1962/.
2. А.А. Глазов, Л.М. Онищенко. Препринт ОИЯИ, Р-936 /1962/.
3. F.H.James PIRE p В 106, 489 (1959).
4. К.В. Ходатаев. РАИАН, научные труды, т. 1, № 1 /1959/.
5. E.Regenstreif CERN 60 - 26 (1960).
6. J.Pottier. Nuovo Cimento 1 N5 (1955).
7. В. J.Polyakov, В.Т.Zarubin and V.V.Kushin. Proc. Intern. Conf. High Energy Acc. and Instr. 670 CERN (1959).
8. В.Cork. Rev. Sci. Instr. 26, 210 (1955).
9. Ю.Д. Безногих, Л.П. Зиновьев, Г.А. Иванов, В.И. Попов, В.П. Саранцев, Препринт ОИЯИ, Р-957 /1962/.
10. H.E.Jackson, R.L.Martin and J.Waggoner. Rev. Sci. Instr. 30, 187 (1959).
11. А.А. Глазов, Д.Л. Новиков. ЖТФ, ХХУШ, 2295 /1958/.

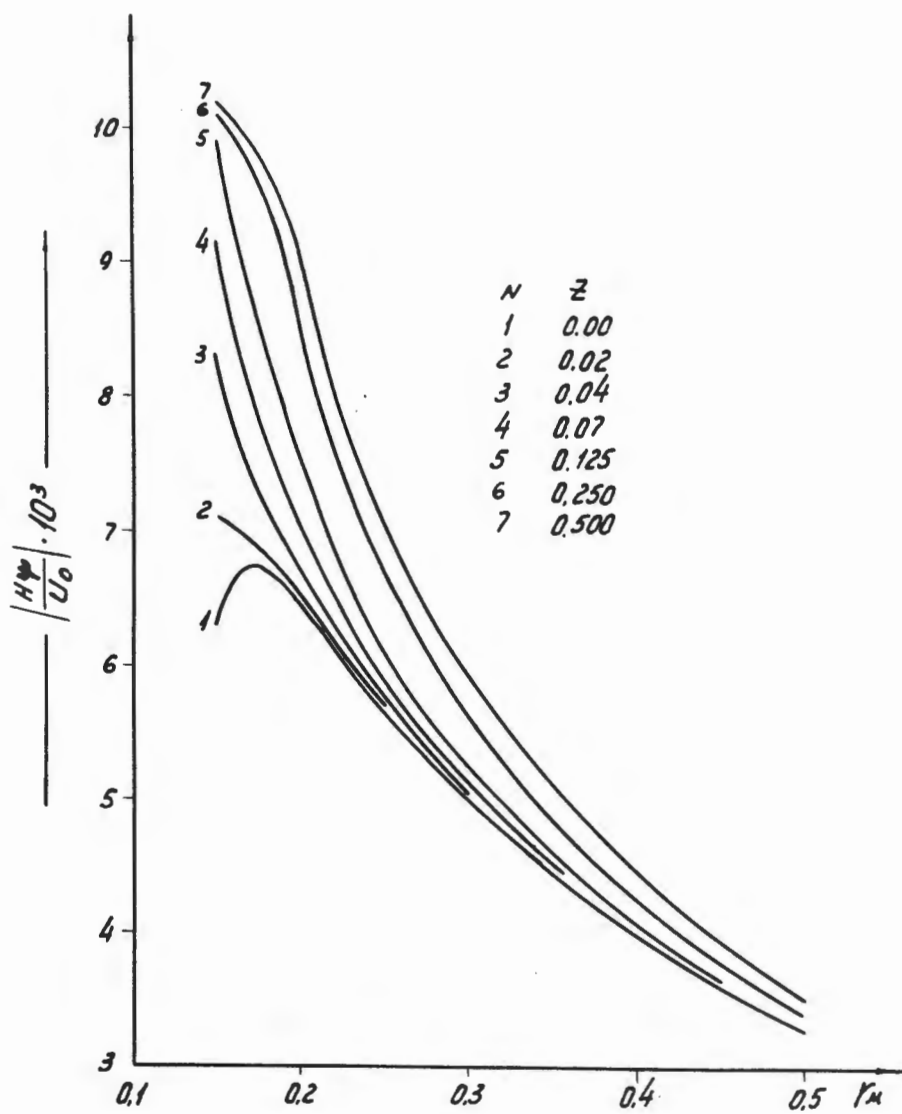
Рукопись поступила в издательский отдел
20 октября 1962 года.



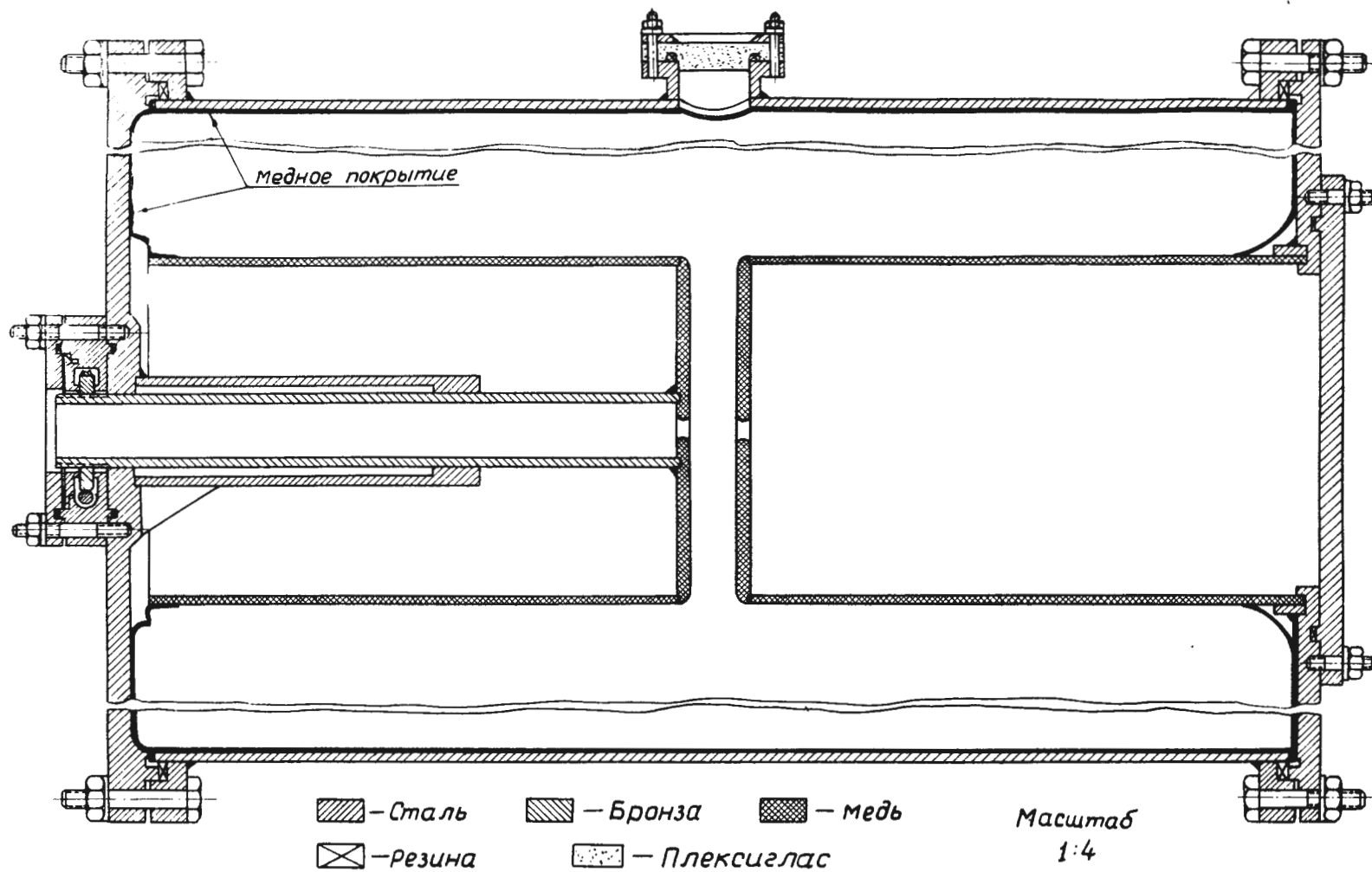
Р и с. 1.



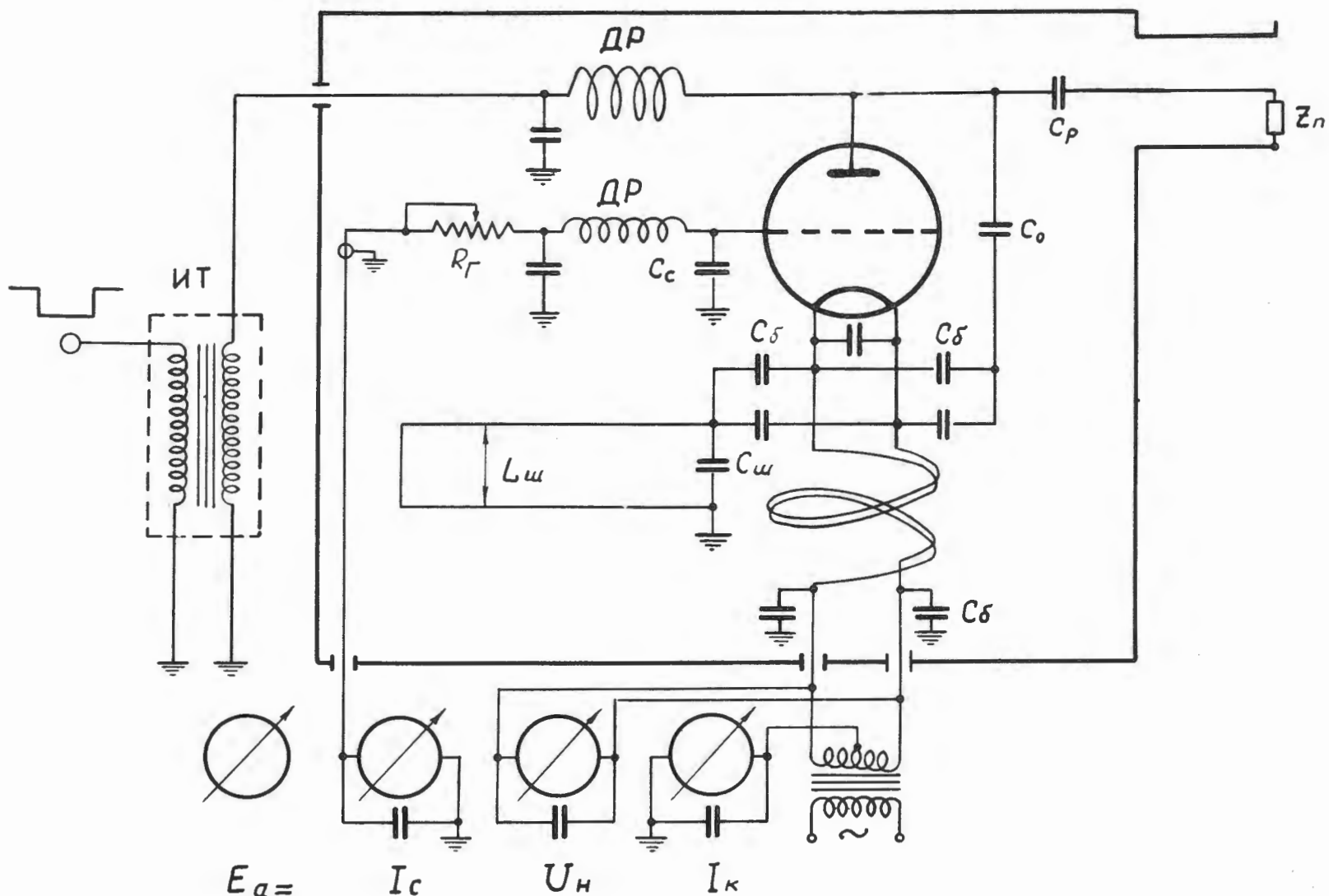
Р и с. 2.



Р и с. 3.

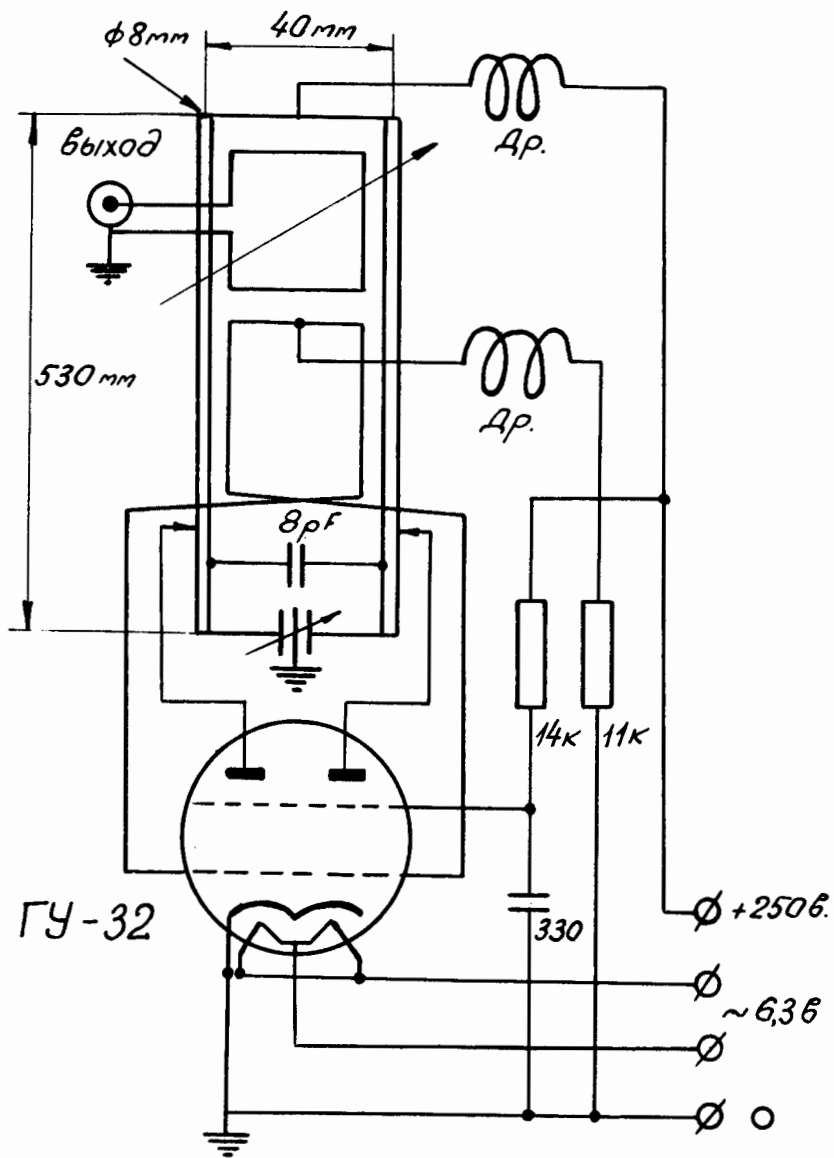


Р и с. 4.

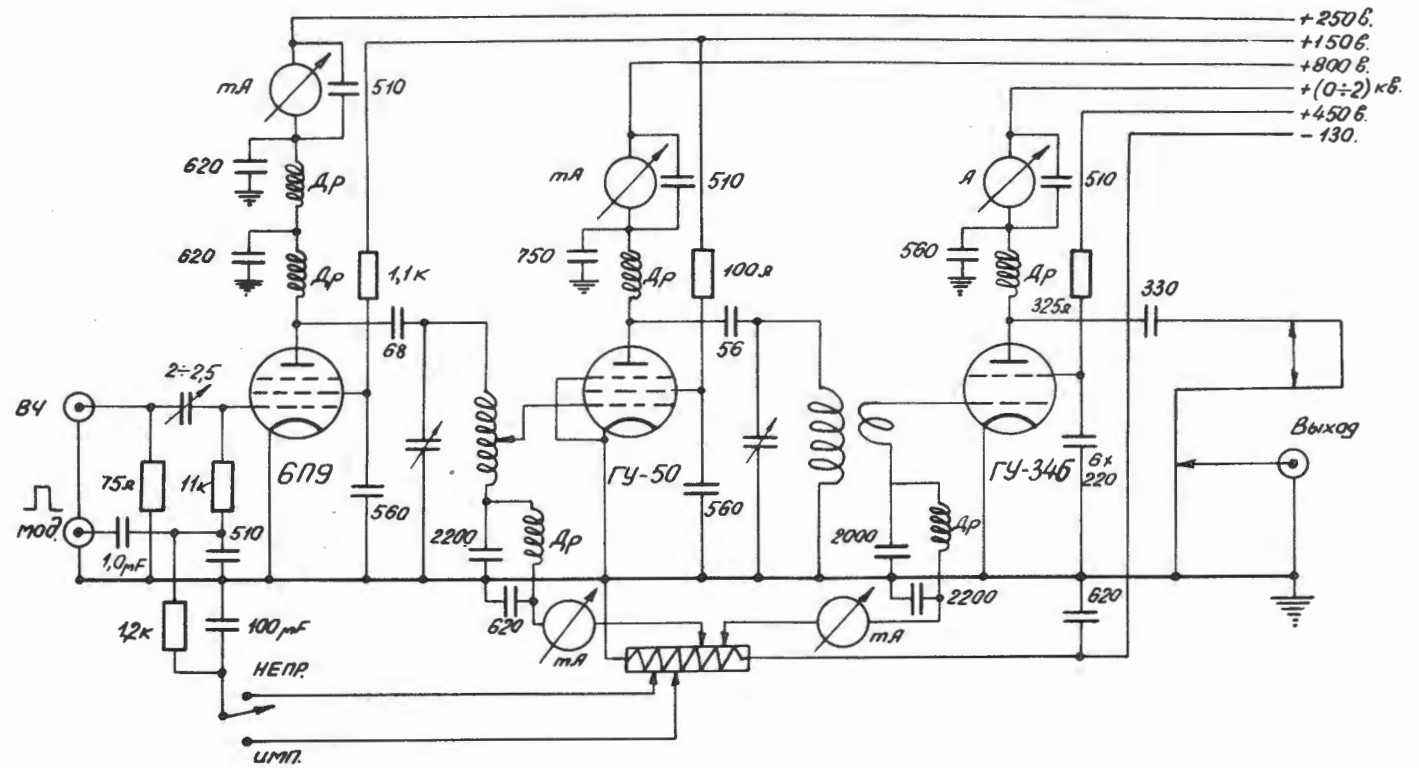

 $E_a =$

Р и с. 5.

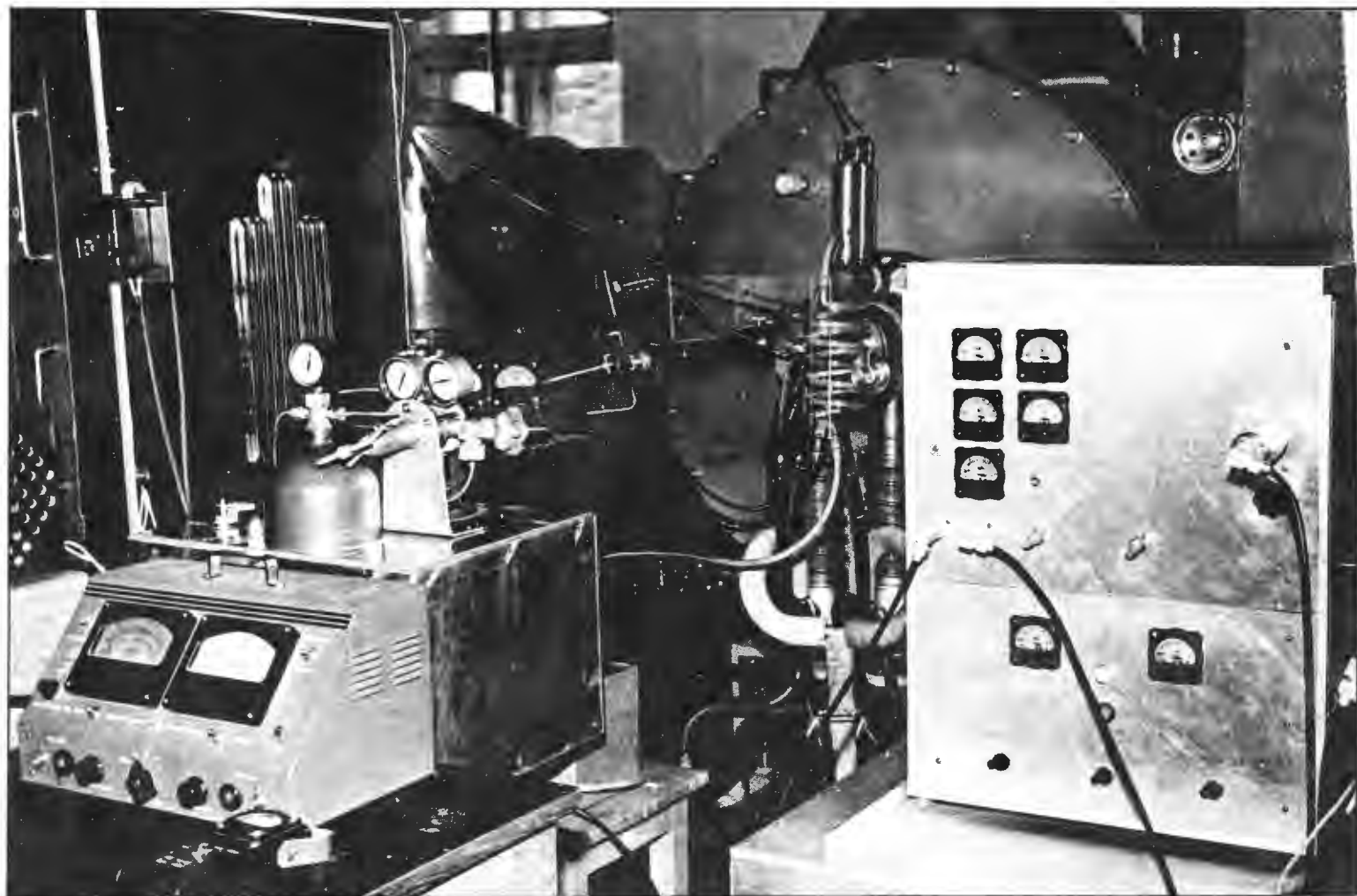
R_r - сопротивление автосмещения, C_p - 8 конденсаторов КВКГ 470 μF /16 кв, включенные двумя последовательными группами, C_o - 2 вакуумных конденсатора КВ-25/25, включенные последовательно, C_o - 7 конденсаторов КВКБ 56 μF /16 кв, L и C - индуктивность и емкость катодного шлейфа, ИТ - импульсный трансформатор, E_a - постоянное напряжение на искусственной линии модулятора /может плавно регулироваться от 0 до 10 кв/, Z - нагрузка, обусловленная резонатором,



Р и с. 6.



Р и с. 7.



Р и с. 8.