

С345  
С-92

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

---

Е. Схвабе (Е. Швабе)

2709-1

ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СИСТЕМА МОДЕЛИ  
КОЛЬЦЕВОГО ПРОТОННОГО ФАЗОТРОНА

Автореферат диссертации, представленной на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
кандидат физико-математических наук

А.А. ГЛАЗОВ

Дубна 1966

Е. Схвабе (Е. Швабе)

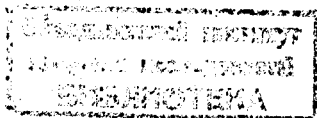
2708-1

ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СИСТЕМА МОДЕЛИ  
КОЛЬЦЕВОГО ПРОТОННОГО ФАЗОТРОНА

Автореферат диссертации, представленной на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
кандидат физико-математических наук

А.А. ГЛАЗОВ



3628 бр.

## В в е д е н и е

Успехи, достигнутые ускорительной техникой за последние 20 лет, основаны прежде всего на открытии В.И. Векслером <sup>/1/</sup> и Е.М. Макмилланом <sup>/2/</sup> в 1944-45 г.г. принципа автофазировки.

Действующие в настоящее время ускорительные установки типа синхрофазотронов, в которых наряду с автофазировкой используются магнитные поля с переменными градиентами <sup>/3/</sup>, дают возможность получить ускоренные протоны с энергией 35 Гэв. Проектируемые синхрофазотроны позволят увеличить этот предел приблизительно до 200-300 Гэв.

Однако общим недостатком этих ускорителей является малая интенсивность ускоренных пучков из-за импульсного характера ведущего магнитного поля.

В то же время дальнейшее развитие физики частиц высоких энергий настоятельно требует повышения интенсивности ускоряемых пучков частиц. Использование для изучения ядерных процессов встречных пучков частиц, исследование ядерных реакций, вызываемых К-мезонами, а также необходимость существенно повысить точность экспериментальных результатов - все это можно осуществить только при значительном увеличении интенсивности пучков частиц.

Одним из ускорителей, которые разрешают получить большую величину среднего тока ускоряемых частиц при больших энергиях, является кольцевой фазотрон.

В Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований был разработан проект модели кольцевого фазотрона <sup>/6/</sup> для исследования процесса инжекции частиц в кольцевую систему со спиральной структурой магнитного поля, а также для определения оптимальных условий захвата частиц в синхронный режим и изучения начальной стадии фазотронного ускорения высокочастотным электрическим полем.

Разработка и исследование высокочастотной системы модели кольцевого протонного фазотрона ЛЯП является предметом настоящей диссертации.

## I. Некоторые проблемы радиотехники в кольцевых фазотронах

К основным проблемам ускорительной высокочастотной техники можно отнести:

а) создание ускоряющего напряжения на многоэлектродной системе, размещенной внутри вакуумной камеры; в) программирование напряжения в.ч. на электродах; с) генерирование в.ч. мощности в большом диапазоне частот; д) передача высокочастотной мощности для питания ускоряющих электродов в большом диапазоне частот.

Эти проблемы в зависимости от размеров ускорителя могут быть решены различными способами, однако они имеют ряд общих свойств и поэтому существует возможность решения некоторых из них одним путем.

Рассматриваемая высокочастотная система предназначена для ускорителя с размерами ускорительной камеры:  $r_1 = 2380$  мм,  $r_2 = 2540$  мм,  $h = 40$  мм (рис. 1).

Частота обращения протонов изменяется в три раза от 0,9 до 2,7 Мгц и высокочастотная система должна обеспечить прирост энергии частиц 2 кэв/оборот в указанном диапазоне или на кратных частотах, считая что  $\cos \phi_s = 0,5$ , где  $\phi_s$  — значение равновесной фазы.

Рассматриваемый ускоритель не имеет свободных прямолинейных участков и общие размеры установки не позволяют образовать полость значительных размеров вокруг ускоряющего промежутка, что позволило бы увеличить импеданс нагрузки и тем самым снизить высокочастотную мощность, необходимую для получения ускоряющего напряжения. Структура магнита, который состоит из 18 секций, а также соображения удобства создания высокочастотного генератора обусловили выбор рабочей частоты, равной девятой кратности частоты обращения ( $8 \leq f \leq 25$  Мгц).

Изменение частоты обращения во времени для рассматриваемого ускорителя в релятивистском случае ( $\beta_{\text{макс}} = 0,14$ ) при постоянстве синхронной фазы  $\phi_s$  будет описываться соотношением

$$\omega = (C_1 t + C_2)^{\frac{\bar{n}}{\bar{n}+1}} \quad (1)$$

причем

$$\cos \phi_s = - \frac{2\pi E}{e V_0 \omega^2 \cdot K} \cdot \left( \frac{d\omega}{dt} \right) = \text{CONST.} \quad (2)$$

где  $K = 1 - \frac{\bar{n}}{(1-\bar{n})\beta^2}$ ;  $C_1, C_2$  — постоянные, определяемые начальными условиями;  $\bar{n}$  — средний показатель поля;  $\beta$  — относительная скорость частицы;  $E$  — энергия частицы;  $eV_0$  — максимальный набор энергии за оборот.

Из уравнения (1) видно, что при  $\bar{n} \gg 1$  частота ускоряющего поля должна изменяться приблизительно линейно от времени. Однако для исследования захвата и начальной стадии режима ускорения полезно иметь возможность несколько изменять фазу  $\phi_s$  в процессе ускорения.

Из (2) следует, что это может достигаться как некоторым изменением закона изменения частоты от времени, так и программированием амплитуды ускоряющего напряжения в течение цикла ускорения.

## II. Система передачи энергии и ускоряющие электроды

Проблема передачи энергии с более чем 3-кратным перекрытием по частоте на определенное расстояние ( $l = 4,5$  м) и система ускоряющих электродов рассматриваются в главе II /7/.

Ускорение осуществляется девятью дрейфовыми трубками, расположенными равномерно по кольцу ускорителя и питаемыми синфазно. Длина каждой из этих трубок выбрана так, что она занимает угол  $10^\circ$  на окружности радиусом 2450 мм (средний радиус ускорительной камеры). Необходимый набор энергии за оборот достигается, когда амплитуда напряжения на трубке по отношению к земле составляет 320 в.

Дрейфовая трубка имеет емкость 200 пф относительно стенок камеры. Активная нагрузка, обусловленная пучком при токе 1 ма, составляет более 100 ком на трубку, и, таким образом, можно считать, что задача заключается в получении необходимого напряжения в заданном диапазоне частот на чисто реактивной нагрузке.

Передачу в.ч. мощности к ускоряющим электродам можно осуществить с помощью системы фидеров с бегущей волновой или с помощью резонансной системы, в которой фидеры являются частью колебательного контура в.ч. генератора. В первом случае для получения режима бегущей волны в диапазоне частот остается использовать схему постоянного динамического сопротивления, что влечет за собой применение больших мощностей.

Мощность в резонансной системе, идущая главным образом на омические потери в линиях передачи, составляет 3 – 4 квт, что примерно в 20 раз меньше, чем в первом случае. В связи с этим была разработана резонансная система передачи мощности в.ч., которая входила в колебательный контур осциллятора.

Для перестройки частоты был использован конденсатор переменной емкости (емкостный вариатор  $C_M / C_{\text{макс}} = 100/1600$ ).

Соотношение между длинами фидеров и волновыми сопротивлениями (для автогенераторного варианта) были выбраны таким образом, что:

- 1) перекрытие рабочего диапазона частот осуществлялось емкостным вариатором с минимальным перекрытием по емкости;
- 2) обеспечивались разумные коэффициенты трансформации напряжения от анода к дрейфовой трубке;
- 3) изменения напряжения на дрейфовой трубке в процессе изменения частоты были минимальными;
- 4) генератор с фидерами удобно располагался внутри кольца ускорителя.

В главе II диссертации показаны способ и условия решения этих проблем. Измерения на модели подтвердили правильность теоретических предположений и практических решений, принятых при проектировании резонансной системы линий передачи. Экспериментальные результаты отклоняются от теоретических не более чем на  $\pm 10\%$ .

На рис. 2 приведена схема резонансной системы. На рис. 3 показано изменение эквивалентной индуктивности системы линий передачи в зависимости от частоты.

### III. Генератор высокой частоты

Этому вопросу посвящена III глава диссертации. Исследованы оптимальные условия работы осциллятора, в контур которого входила система линий передачи. Был построен осциллятор, который дал более чем трехкратное (8-25 МГц) перекрытие по частоте (см. рис. 4). Для обеспечения малых изменений амплитуды ускоряющего напряжения напряжение на колебательном контуре должно изменяться пропорционально коэффициенту трансформации линии передачи, что и было получено подбором обратной связи. В этой схеме была применена комбинированная обратная связь Мейснера-Хартли, ее коэффициент для упрощенного случая ( $i_g = 0$ ;  $s_g = 0$ ) имеет вид:

$$K' = \frac{U_g}{U_a} = \frac{Y_{ga} - S + \frac{jM}{(M^2 - L_a L_g)\omega}}{Y_{go} + \frac{1}{r_g} + \frac{Y_{ga} jL}{(M^2 - L_a L_g)\omega}} \cdot 1 + \frac{1 - M}{\omega^2 CL_g' - 1} \quad (3)$$

где  $Y_{ga}$  адмитанс - между сеткой и анодом

$Y_{go}$  адмитанс - между сектой и катодом,  $L_g' = (L_g - M^2/L_a)$ .

Некоторые экспериментальные данные работы осциллятора приведены на рис. 5 ( $U_g, U_d, U_k, I_{a0} = f(\omega)$ ). Осциллятор работал в классе (B-C):  $\theta_a = 90^\circ$ ,  $\theta_g = 10^\circ$ ,  $\xi = 0,93$ . На рис. 6 показано напряжение, полученное на ускорительных электродах  $U_k = f(\omega)$  (снимок с экрана осциллографа).

### IV. Программирование ускоряющего напряжения

Возможность программирования ускоряющего напряжения является важной проблемой в технике ускорителей. Она связана с оптимальной настройкой ускорения при заданной зависимости частоты от времени, которая в разработанной модели, как обычно в фазотронах, задается формой пластин вариатора и практически не поддается регулировке.

Глава IV диссертации посвящена этой проблеме. Особенностью решения ее является непосредственное программирование автогенератора в автоанодной модуляции, у которого в процессе модуляции меняются условия возбуждения. Это ведет к изменению остальных параметров. При этом появляются специфические трудности в получении необходимой глубины и линейности модуляции. Благодаря использованию схемы автоанодной модуляции (ААМ) удается успешно осуществлять программирование амплитуды ускоряющего напряжения с помощью маломощного (20 Вт) и простого модулятора (вопросам модулятора и программе модуляции посвящается глава V).

В главе IV приведен анализ работы осциллятора, запрограммированного импульсами заданной формы в непрерывном и импульсном режимах. Программирование можно осуществлять в любой точке импульса в.ч. (любая точка процесса ускорения). Программу можно плавно менять как по длительности, так и по форме импульсов. Приведенный анализ дал возможность определять условия ААМ-осциллятора при квазилинейных модуляционных характеристиках.

В процессе модуляции импульс анодного тока сильно меняется от глубины модуляции ( $m$ ). Однако форма его для данных требований строго определена двумя условиями: во-первых, линейной зависимостью первой гармоники тока от напряжения

$$I_{a1} = \Xi' E_a(m) = \Xi' U_{a1}(m) \cdot \frac{1}{\xi} \quad (4)$$

где  $\Xi' = \frac{\Phi'}{\Gamma'}$  .  $\Lambda'$

$$\Phi' = \frac{1}{\cos \theta_g} \left( \frac{\beta_1 \theta_g - \beta_1 \theta_a}{\beta_1 \theta_a - \beta_1 \theta_g} \right); \Lambda' = \left( 1 - \frac{K\xi}{\mu_g} \cos \theta_a \right); \Gamma' = \frac{1}{S(D - \mu_g) \beta_1^{\theta_g} - \beta_1^{\theta_a}} + R_d$$

$$\beta_m^{\theta_m} = c_{2\theta_m} (1 - \cos \theta_m) = \frac{I_m(\theta)}{S(U_g - DU_a)}$$

$\theta_a, \theta_g, \theta_2$  - углы отсечки импульса анодного тока,

$R_d$  - динамическое сопротивление,

$\mu, S, D$  - параметры лампы,

$\xi$  - коэффициент использования анодного напряжения,  $K = U_g / U_a$ .

Линейности уравнения (4) от  $(m)$  можно осуетствить при  $\Xi(m) = \text{CONST}$ .

Это имеет место для:  $\xi(m), K(m), R_d(m) \approx \text{CONST}$

$$\theta_a = 120^\circ \div 160^\circ = f(m); \theta_g(m) = 35^\circ \div 50^\circ; \theta_2(m) = \text{CONST} = \arccos \frac{1}{\xi}.$$

Второе условие, определяющее форму  $i_a(m)$ , это требование к постоянной составляющей тока. В процессе модуляции должно выполняться условие:

$$|(I_{a0})_M + \Delta I_{a0}(m)| < (I_{a0})_T \quad (5)$$

где  $M$  относится к пиковой точке,  $T$  - к телеграфной.

В главе IV приводятся ряд номограмм функций:  $\Lambda(\theta_a, k); \Xi(\theta_a, \theta_g); \Phi(\theta_a, \theta_g); \Gamma(\theta_a, R_d)$ , с помощью которых можно быстро определить режим работы осциллятора. Приводится также расчет осциллятора, работающего в условиях программирования (ААМ). Приведен анализ и расчет модуляционного дросселя.

Полученные экспериментальные данные (глава VI) подтверждают теоретические рассуждения с точностью до  $5 \div 10\%$ .

На рис. 7а показана модуляция АА при непрерывном режиме работы осциллятора для  $f = \text{CONST}$ . На рис. 7б - при импульсном режиме и  $f = \text{CONST}$ ; на рис. 7в - для диапазона  $f = 8 - 25$  МГц в импульсном режиме. На фотографии показано программирующее напряжение модулятора на сетке осциллятора и ускоряющее напряжение на электродах.

#### В. Заключение

В работе показана возможность передачи энергии в.ч. с более чем 3-кратным перекрытием в диапазоне ( $8 \div 25$  МГц) на расстояние 4,5 м с помощью неоднородных резонансных коаксиальных линий. Выходной импеданс этой системы передачи носил характер индуктивный и квазипостоянный.

Как следует из проведенного анализа, количество электродов при этом не имеет принципиального значения и практически может быть достаточно большим, что позволяет увеличивать набор энергии за оборот.

Используя максимально возможные напряжения, получаемые на анодах современных генераторных ламп, можно получить в.ч. напряжение относительно земли порядка

$3500 \div 3000$  в.

Благодаря тому, что многие функции выполняет лампа осциллятора, оказалось возможным создать довольно простую схему, питающую в.ч. мощностью систему передачи. Схема представляет собой мощный осциллятор на генераторном триоде. Этот осциллятор генерирует несущую частоту с перекрытием больше чем в 3 раза. Перестройка частоты (модуляция по частоте) осуществляется путем изменения емкости ( $C_{max}/C_{min} = 16$ ) в колебательном контуре, индуктивность которого образована выходным импедансом системы передачи.

Особенностью работы этой схемы является непосредственное программирование лампы осциллятора по амплитуде с помощью принципа АА-модуляции. Надо отметить, что такой вид модуляции мощного осциллятора очень удобен в тех случаях, где нужно запрограммировать с малой мощностью и при наиболее простой схеме передатчика. Учитывая возможность плавного изменения формы программирующего импульса в модуляторе, с помощью этой системы возможно точно подобрать оптимальные условия ускорения в кольцевых фазотронах.

#### VI. Выводы

Теоретические вычисления и экспериментальные измерения на модели, результаты которых приведены в этой работе, подтвердили возможность создания системы в.ч., питающей в оптимальных энергетических условиях ускоряющие электроды кольцевого фазотрона типа FFAC по заданной программе.

Основные результаты исследований, описанных в диссертации, опубликованы в работах <sup>4-6/</sup>.

#### Литература

1. В.И. Векслер. ДАН 49, 346 (1944).
2. E.M. Mac Millan. Phys. Rev. 68, 346 (1944).
3. N.Christopoulos, E.D.Currant, N.S. Livingston, H.Snyder, Phys. Rev. 88; 1190 (1952).
4. Д.П. Василевская, А.А. Глазов, Е. Швабе (J.Schwabe). Nuclear. INSTR and Methods, 21.
5. А.А. Глазов, Е. Швабе (J.Schwabe). Nukleonika VII, N=7/8, 1962.
6. А.А. Глазов, Е. Швабе (J.Schwabe) Nukleonika, Препринт ОИЯИ, P-2732-1, 1966.
7. Н.Т. Круглов. Радиотехника, 2, 1949.

Рукопись поступила в издательский отдел  
22 апреля 1966 г.

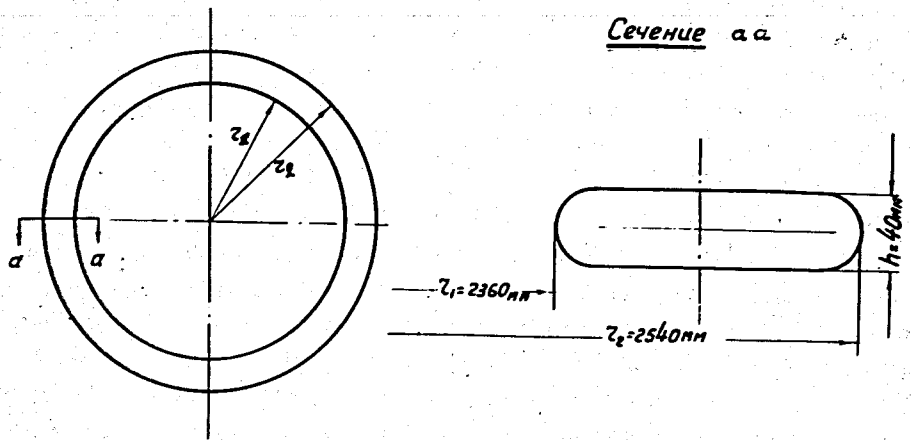


Рис. 1.

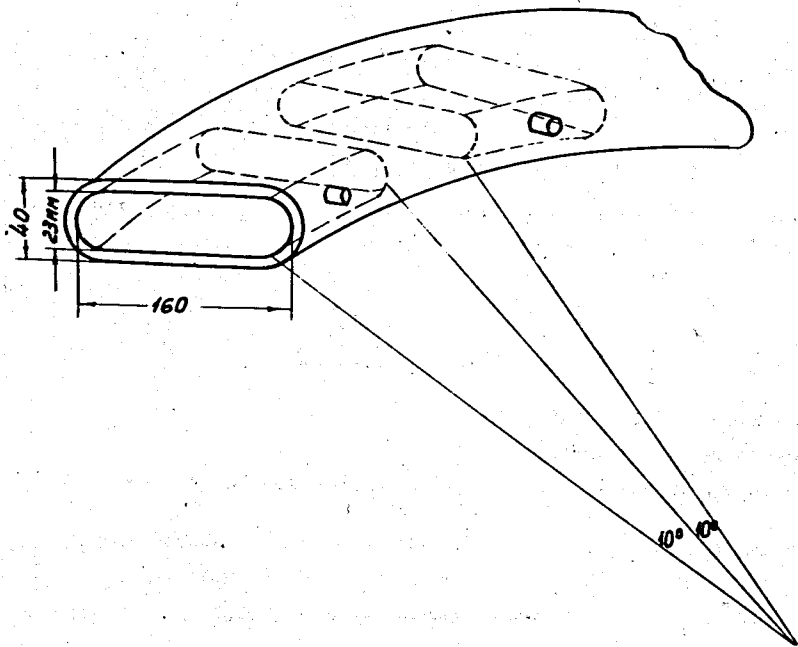
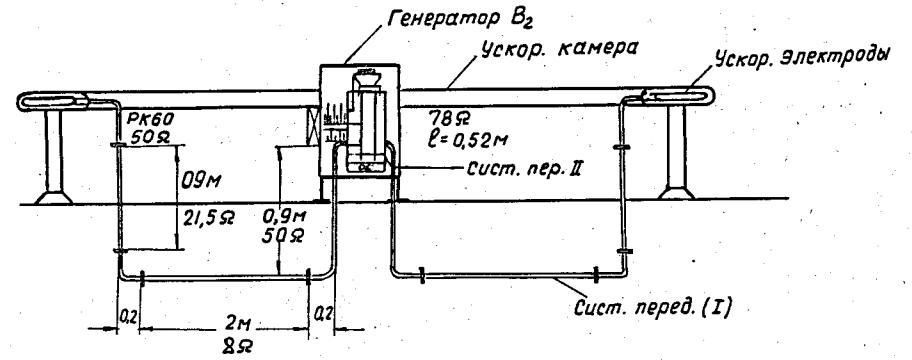
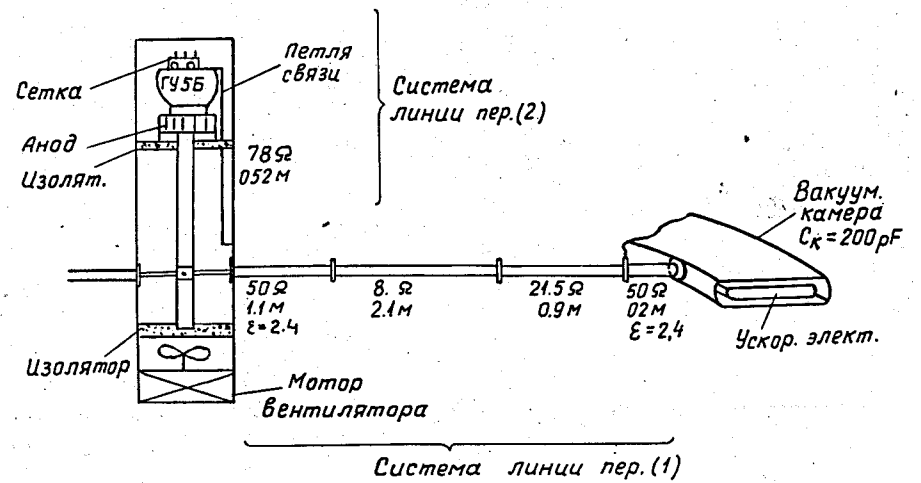


Рис. 1а.



а)



б)

Рис. 2.

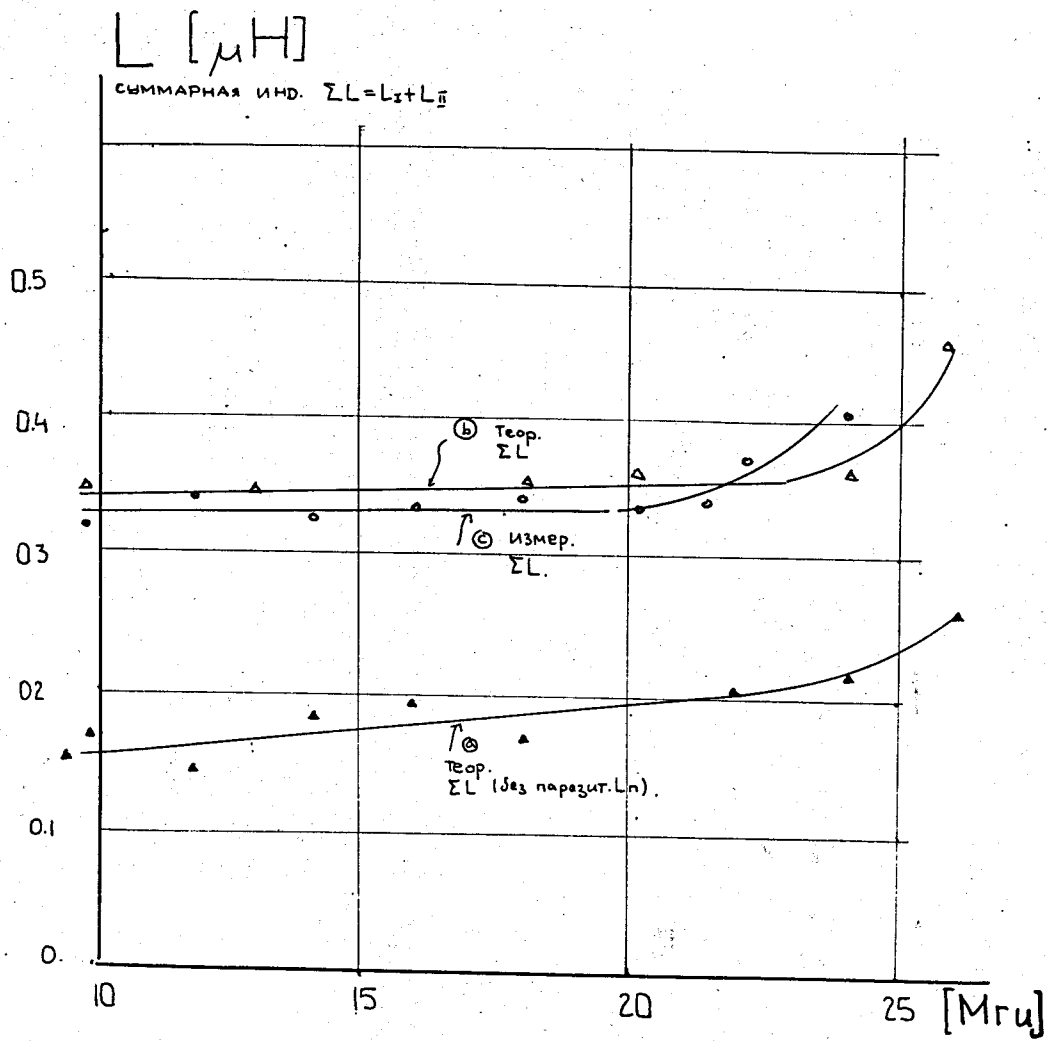


Рис. 3.

$$C_K = 200 \text{ [pF]}$$

$$U_K = 300 \pm 10\% \text{ [V]}$$

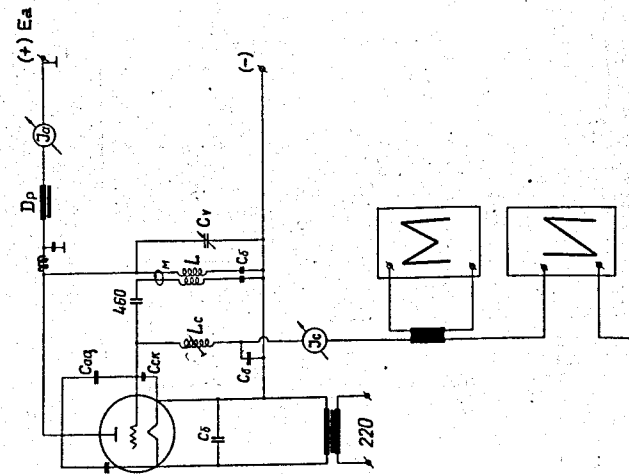
$$r = 24 \text{ [M]}$$

$$F = 80 \div 25 \text{ [Mc/s]}$$

$$F' = 100 \text{ [c/s]}$$

$$\tau = 5 \text{ [ms]}$$

$$\eta = 30 \text{ [%]}$$





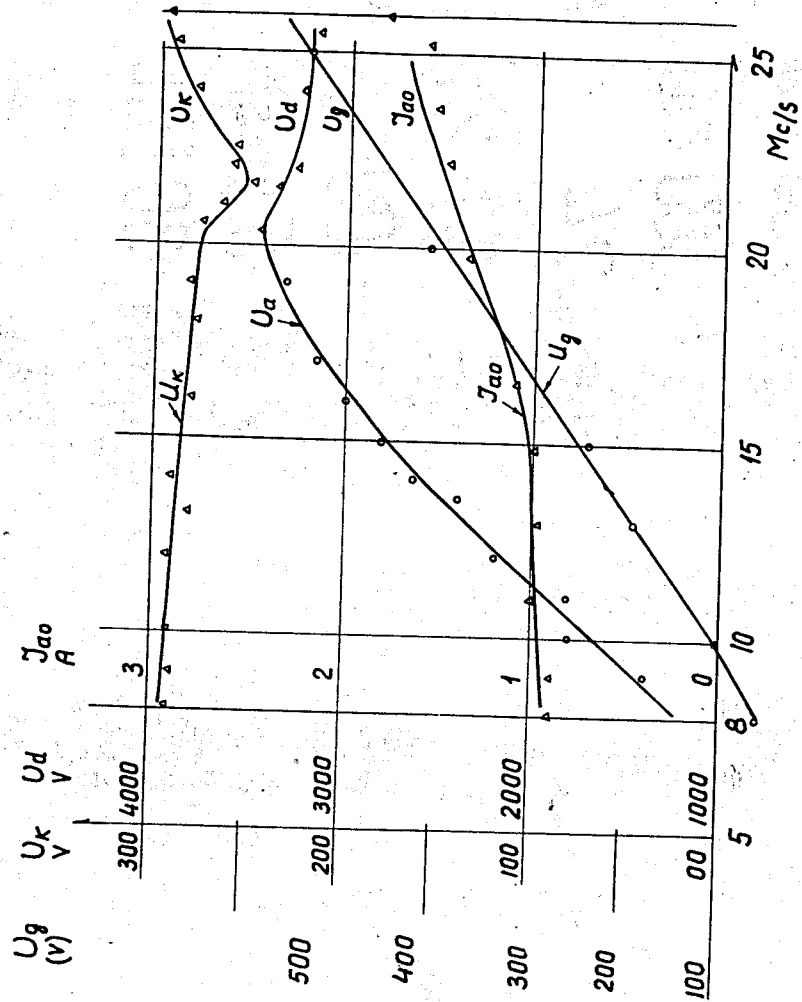
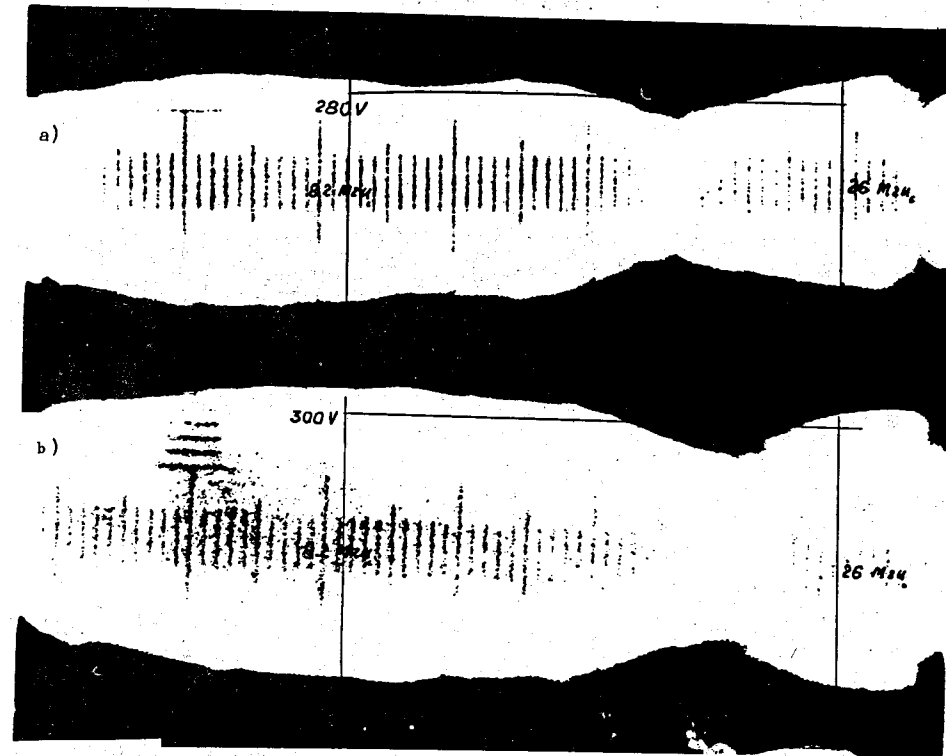


Рис. 5.



I тип. обратной связи.

$U_k = f(\omega)$

$f = 8.0-2$

a) -  $E_a = 2500$  V

б) -  $E_a = 2800$  V.

Рис. 6.

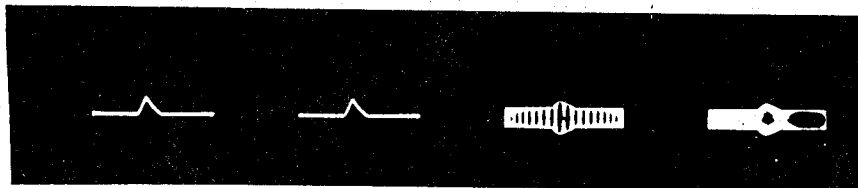


Рис. 7а. : (mod.: AM)  $f = \text{CONST.} = 10 \text{ Mc/s}$

$U_{kN} = 310 \text{ V}, U_{aN} = 1850 \text{ V}, U_{aM} = 584 \text{ V}, U_{aM} = 3500 \text{ V}, P_{aM} = 3.65 \text{ KW} = P_{aM} 05$   
 $E'_g = 75 \text{ V}, \tau_1 = 3 \text{ ms}, F_{\text{imp.}} = 160 \text{ c/s}, m' = 88 \%$

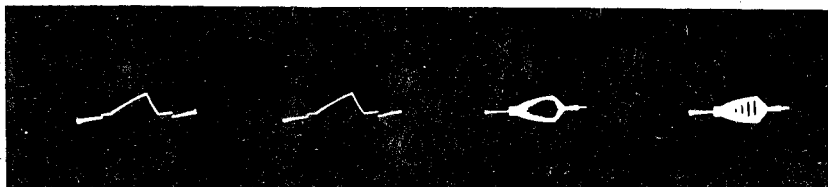


Рис. 7б. : (mod.: PM+AM)  $f = \text{CONST.} = 10 \text{ Mc/s}$

$U_{kN} = 250 \text{ V}, U_{aN} = 1500 \text{ V}, U_{kM} = 655 \text{ V}, U_{aM} = 3940 \text{ V}, E'_g = 150 \text{ (} E'_{g \text{ imp}} = 20 \text{ V}$   
 $E'_{g \text{ mod.}} = 130 \text{ V), } m' = 164 \%, \tau_1 = 7 \text{ ms}, \tau_2 = 12 \text{ ms}, F_{\text{imp.}} = 42 \text{ c/s.}$

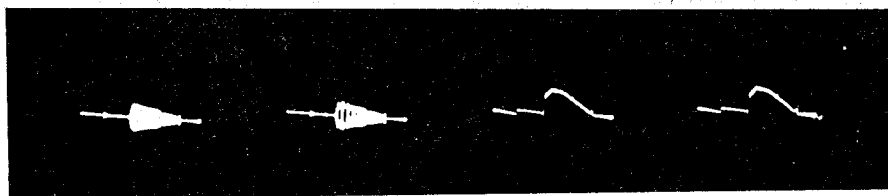


Рис. 7в. : (mod.: PM+AM+FM)  $f = 8.0-25.0 \text{ Mc/s}$

$U_{kN} 8.0 \text{ Mc/s} = 200 \text{ V}, U_{kM} 25 \text{ Mc/s} = 620 \text{ V}, E'_g = 100 \text{ V (} 80+20$   
 $\tau_1 = 8 \text{ ms}, \tau_2 = 16 \text{ ms}, F_{\text{imp.}} = 31 \text{ c/s}, m' = 220 \%$