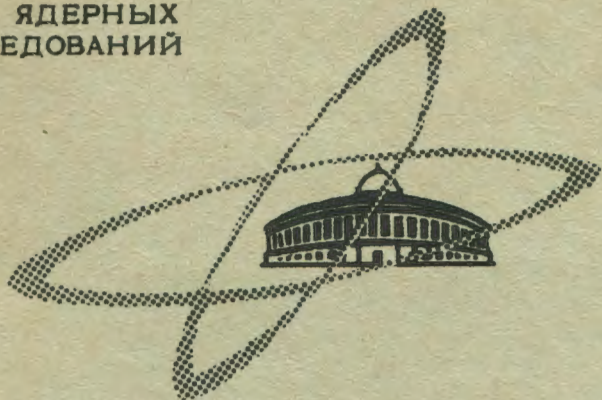


E-648

СЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

Р9 - 3970



И.Б.Енчевич, Т.Н.Томилина

ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ
ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОЦИКЛОТРОНА
В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

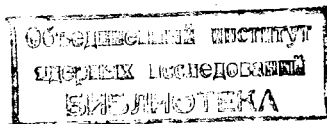
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1968

Р9 - 3970

И.Б.Енчевич, Т.Н.Томилина

ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ
ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОЦИКЛОТРОНА
В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ



В в е д е н и е

Эффективность работы синхроциклотрона в значительной степени зависит от устойчивости движения частиц/1/. Последнее, со своей стороны, наряду с другими параметрами, определяется также амплитудно-частотной зависимостью ускоряющего напряжения от времени/2/.

При запуске синхроциклотрона на 680 Мэв для целей контроля и измерения амплитуды и частоты напряжения в диапазоне $26,5 \pm 13,5$ Мгц внутри камеры были размещены емкостные делители напряжения с коэффициентом деления $K = 98,34 \pm 1,96$. Делители расположены вблизи ускоряющей кромки дуанта, симметрично относительно его продольной оси.

Измерение амплитуды и частоты ускоряющего напряжения производилось в динамическом и статическом режимах/3/.

В первом случае, при вращающемся вариаторе, сигнал с емкостного делителя подавался на вертикальные пластины контрольного осциллографа. Изображение модулировалось по яркости при помощи специальной частотной марки, которая формировалась гетеродинным способом. Лимб переменного конденсатора гетеродина был отградуирован в частотах рабочего диапазона в.ч. генератора ускоряющего напряжения. Ширина частотной марки зависела от скорости изменения частоты в.ч. генератора.

Во втором случае сигнал с емкостного делителя использовался для измерения амплитуды напряжения и частоты ускоряющей системы на фиксированных углах поворота вариатора при постоянном напряжении анодного питания генератора.

Недостатками первого способа являются отсутствие связи амплитудно-частотной характеристики со временем и зависимость ширины частотной марки от крутизны частотной характеристики (df/dt). При измерении амплитудно-частотной зависимости вторым способом на резонансную систему во избежание пробоев подается напряжение ниже номинального в динамическом режиме. Точность результатов измерений при пересчете на номинальное значение напряжения снижается из-за нелинейности зависимости $U_d = \xi(E_{\text{н}})$. Кроме того, статическая характеристика не учитывает явления затягивания, зависимости потребляемой в.ч. генератором мощности от частоты и нагрузку пучком резонансной системы при работе ускорителя. К недостаткам этого метода следует добавить, что операторы во время измерений работают в активной зоне ускорителя.

При наладке синхрофазотрона на 10 Гэв были рассмотрены четыре метода измерения частоты частотно-модулированных колебаний в диапазоне частот от 150 Кгц до 12 Мгц /4/: метод селектирования, метод стробирования, метод двухканального гетеродирования и фазовый метод. Однако из-за значительного различия частотного диапазона и скорости изменения частоты непосредственное использование такой же аппаратуры для синхроциклотрона на 680 Мэв было невозможно. К тому же в случае синхрофазотрона в основном требовалось выработать управляющий импульс по достижении заданной частоты, а не ставилась задача снятия амплитудно-частотной характеристики в функции времени.

Для исследования рабочих режимов синхроциклотрона требовалось измерять амплитуду и частоту ускоряющего напряжения в динамическом режиме при минимальном количестве разработок новых устройств, с точностью не хуже точности снятия характеристик в используемых методах и за короткое время. Точность измерений в динамическом режиме составляла $\pm 2\%$ для частоты и $\pm 15\%$ для амплитуды. Статическая характеристика снималась с точностью $\pm 10\%$ для амплитуды, $\pm 0,8\%$ по частоте (волномер 513) и $\pm 2\%$ по установке угла поворота вариатора (один период модуляции на шкале делился на 80 частей).

В настоящей работе для измерения амплитудно-частотной характеристики от времени используется гетеродинирование в комбинации с методами селектирования и стробирования.

1. Общий принцип построения блок-схемы

Для того, чтобы при измерении частоты частотно-модулированного сигнала в измерительном устройстве освободиться от перестраиваемого селективирующего контура, используется смеситель (рис. 1), на один вход которого подается в.ч. напряжение от емкостного делителя, а на другой - от генератора ГСС-7. Выход смесителя настроен на промежуточную частоту, выбранную ниже рабочего диапазона для избежания зеркальных каналов на измеряемых частотах.

Генератор стробирующих импульсов заданной длительности открывает усилитель промежуточной частоты (УПЧ) в фиксированный момент времени t . На выход УПЧ сигнал, контролируемый осциллографом, проходит только в том случае, если разница измеряемой частоты f_{Γ} генератора ГСС-7 и мгновенной частоты ускоряющего напряжения $f_{вч}(t)$ в фиксированный момент времени $t_{пр}$ равна постоянной промежуточной частоте $f_{пр}$.

$$f_{\Gamma} - f_{вч}(t) = f_{пр}$$

отсюда искомая частота $f_{вч}(t) = f_{\Gamma} - f_{пр}$

Стробирующий импульс подается и на подсветку второго луча осциллографа, непосредственно на пластины которого поступает измеряемое напряжение. Учитывая чувствительность трубки, частотную характеристику кабеля и коэффициент деления емкостного делителя, легко определить для фиксированного момента времени t , вслед за частотой и амплитуду ускоряющего напряжения.

Были рассмотрены три способа получения стробирующих импульсов:

1. В первом из них радиальный световой луч фотоустройства прерывался диском со щелями, вращаемым синхронным двигателем с частотой модуляции (рис. 1а). Фиксация момента времени производилась поворотом фотоустройства на заданный угол. Число возможных фиксированных моментов времени для измерения частоты и амплитуды определялось числом щелей на диске и оставалось неизменным для любой частоты модуляции (рис. 2 и 3).

2. Во втором импульсы, частота следования которых в 100 (или 1000) раз больше частоты модуляции, поступали с генератора на пересчёт-

ное устройство (рис. 16). В каждом периоде модуляции считалось число импульсов генератора, и, если оно отличалось от выбранной кратности, разность с учётом знака и веса запоминалась и поступала на систему автоматической подстройки частоты. Если в течение одного периода модуляции из-за неполного соответствия управляемой и управляющей характеристик не наступает выравнивания частот, разность будет добавляться в память до выравнивания. Расхождение компенсируется независимо от того, вызвано оно уходом частот генерации или модуляции.

3. И, наконец, в третьем способе (рис. 1 в) в качестве стробирующего импульса был использован импульс с выхода стандартного генератора импульсов Г5-4Б с фиксированной временной задержкой относительно импульса фотодатчика системы управления синхротроном^{/5/}.

Качество механического исполнения диска со щелями определяет точность получения стробирующих импульсов первым способом. Однако значительная дополнительная погрешность при получении временных меток может быть связана с качанием фазы^{/6/} при увеличении механической нагрузки синхронного двигателя. Оказалось, что среди одно- и трехфазных синхронных двигателей, выпускаемых серийно, трудно подобрать подходящий для запуска от П-образных импульсов фотодатчика: однофазные плохо держат синхронизм при изменении частоты, а трехфазные требуют преобразования однофазного напряжения фотодатчика в трехфазное в широком диапазоне частот. В результате на практике этим способом не пользовались.

Второй способ требовал разработки новой электронной аппаратуры для автоматической подстройки частоты генератора, а в нашем распоряжении были только пересчётные схемы, позволяющие выбирать любой заданный импульс^{/7/}. Необходимость новой разработки заставила отказаться от этого способа получения стробирующего импульса и воспользоваться третьим, хотя в отличие от первых двух он не обеспечивает деления периода модуляции на одно и то же число частей независимо от частоты модуляции.

2. Характеристика узлов принципиальной схемы

Смесительный каскад собран на лампе 6Ж10П (Л₃) (рис. 4). На первую сетку лампы после предварительного усиления (Л₁ Л₂) подавался сигнал от генератора ГСС-7, на третью сетку - частотно-модулированный. Анодный контур смесителя настроен на промежуточную частоту 13,5 МГц.

Следующий каскад - усилитель промежуточной частоты (Л₄) - является одновременно и каскадом совпадений, который пропускает сигнал со смесителя только тогда, когда тот совпадает во времени со стробирующим импульсом.

Стробирующий импульс положительной полярности берется с выхода генератора Г5-4Б, который позволяет осуществить задержку до 10 мсек с шагом в 1 мсек. Стробирующие импульсы, кроме сетки лампы Л₄, подавались также на модулятор яркости того луча осциллографа С1-17, на пластины которого поступало в.ч. напряжение с емкостного делителя. Амплитуда осциллограммы в.ч. напряжения измеряется в том месте, где она модулирована по яркости.

На второй луч осциллографа подается сигнал с выхода УПЧ (Л₄). Максимальная амплитуда сигнала получается путем подстройки генератора ГСС-7, частота которого после этого измеряется электронным частотомером ЧЗ-4А.

Затем временная задержка стробирующего импульса сдвигается на желаемую величину и производятся измерения амплитуды и частоты в следующей точке динамической амплитудно-частотной характеристики.

Учитывая высокую точность измерения частоты прибором ЧЗ-4А ($\pm 2 \cdot 10^{-6} \pm 1$ счёта), погрешность измерения частоты практически целиком будет определяться резонансными свойствами усилителя промежуточной частоты. При этом следует учитывать не только ширину полосы пропускания и температурную нестабильность резонансной частоты контура, но и отличие статической резонансной кривой от резонансной кривой контура (рис. 5), пропускающего частотно-модулированный сигнал/4/. Из рис. 5 видно, что с учётом максимального значения производной df/dt для нашего случая резонансная кривая расширяется в 1,5 раза (по уровню 0,707), а резонансная частота сдвигается от своего статического значения на первоначальную ширину резонансной кривой по тому же уровню.

Точность измерения временных интервалов между стробирующими импульсами в долях периода модуляции определяется, с одной стороны, точностью генератора Г5-4Б ($\pm 0,11$ мксек для задержки 100 мксек и ± 6 мксек для задержки 10 мксек), с другой стороны, уходом в процессе измерений частоты модуляции (стабилизатор частоты поддерживает ее на заданном уровне с точностью $\pm 1,0\%$). При оценке ошибок следует не забывать, что рабочий ход занимает примерно половину периода модуляции.

Точки на характеристике снимались с интервалом 100 мксек, длительность стробирующего импульса была 0,3 мксек. Относительная точность измерения интервалов времени для частоты модуляции $F \approx 112$ гц была не хуже $\pm 0,06\%$.

При определении абсолютной величины амплитуды ускоряющего напряжения на дуанте следует учитывать погрешность эквивалентного коэффициента пересчета $K_{\text{оо}}$, для определения неизвестной амплитуды на дуанте по амплитуде изображения на осциллографе. Эта погрешность $\frac{\Delta K_{\text{оо}}}{K_{\text{оо}}}$

складывается из погрешности измерения коэффициента деления емкостного делителя $\frac{\Delta K_{\text{о}}}{K_{\text{о}}} = \pm 2\%$, погрешности измерения частотной характеристики кабеля $l_1 = 25$ м $\frac{\Delta K_1}{K_1} = 2\%$, погрешности частотной характеристики кабеля $l_2 = 450$ м $\frac{\Delta K_2}{K_2} = \pm 2\%$. Погрешность измерения амплитуды на экране осциллографа для трубки 16ЛО2И с чувствительностью по вертикали 0,6 мм/в $\frac{\Delta A}{A} = 3\%$.

Таким образом, $\frac{\Delta K_{\text{оо}}}{K_{\text{оо}}} = \pm 6\%$ и точность абсолютной величины амплитуды ускоряющего напряжения лежит в тех же пределах, что и при измерении амплитуды в статическом режиме.

Точность относительных измерений амплитуды равна $\pm 3\%$, т.к. погрешность частотных характеристик и емкостного делителя будет составлять постоянную ошибку.

3. Отладка методики

Для настройки анодного контура смесителя, выделяющего разностную частоту, между частотами сигналов с ГСС-7 и с в.ч. автогенератора уско-

ряющего напряжения вместо последнего использовался ГСС-6, его сигнал подавался на третью сетку лампы 6Ж10П, в анод которой был включен настраиваемый контур.

При снятии резонансной кривой частота ГСС-6 изменялась от 10 до 25 Мгц. Резонансная кривая представлена на рис. 5. Резонансная частота контура - 13,56 Мгц, ширина резонансной кривой по уровню 0,707 равна ± 10 кгц при измерениях в статическом режиме.

Проверка точности измерения разностной частоты производилась отдельным измерением частот ГСС-6 и ГСС-7, при помощи электронного частотомера 43-4А. Измерения производились при максимальной амплитуде на анодном контуре 6Ж10П.

Точность измерения разностной частоты получилась $\pm 0,015\%$, хотя, если считать по уровню 0,707, должна быть $\pm 0,025\%$. Это говорит о том, что на экране осциллографа можно фиксировать уменьшение сигнала меньшее, чем 0,707 от максимального.

При измерении изменяющейся во времени частоты нормально запретный резонансный усилитель Л4 отпирался импульсом, длительность которого подбиралась так, чтобы было максимальным усиление в аноде лампы Л4. Для схемы, использованной в измерениях, длительность импульса равна 0,3 мксек.

Так как ширина резонансной кривой по уровню 0,707 в динамическом режиме увеличивается, точность измерения частоты уменьшается, и при измерении частотно-модулированного сигнала составляет $\pm 0,025\%$.

Сравнение снятой таким методом частотной характеристики с частотной характеристикой, измеренной в статическом режиме, дало хорошее совпадение характерных точек (рис. 8).

При измерении амплитуды напряжения на дуанте электростатическим вольтметром типа С-86 производилась непосредственная калибровка амплитуды изображения на осциллографической трубке.

Таким образом вторично был определен коэффициент передачи измерительного тракта, значение которого совпало в пределах точности измерений с ранее вычисленным, по коэффициентам передачи отдельных его частей.

Т а б л и ц а I

t	f _{гср}	$\pm \Delta f$ _{ср}	Λ _{осп}	$K_{ос}$	U_d _{ср}	$\pm \Delta U_d$ _{ср}
мксек	МГц	КГц	мм		кВ	кВ
130	26,066	6	29,67	0,62	18,39	0,27
200	26,015	5	30,33	0,62	18,80	0,27
300	25,911	2	29,67	0,62	18,39	0,27
400	25,764	4	29,67	0,63	18,69	0,28
600	25,209	5	29,67	0,63	18,69	0,28
800	24,025	6	27,73	0,58	17,85	0,25
1000	22,653	6	26,67	0,63	16,80	0,28
1200	21,573	5	32,67	0,62	20,25	0,27
1400	20,070	1	35,00	0,59	20,65	0,59
1600	20,220	2	34,00	0,55	18,70	0,55
1800	19,504	4	30,00	0,53	15,90	0,53
2000	18,632	5	28,67	0,52	14,90	0,23
2200	17,747	4	30,67	0,50	15,33	0,22
2400	17,059	1	36,00	0,49	17,64	0,49
2600	16,444	3	36,00	0,49	17,64	0,49
2800	15,941	6	36,67	0,48	17,60	0,21
3000	15,509	4	34,00	0,47	15,98	0,47
3200	15,135	0	28,67	0,45	12,90	0,20
3400	14,809	4	32,00	0,45	14,40	0,45
3600	14,550	4	32,67	0,44	14,37	0,19
3800	14,373	2	33,00	0,43	14,19	0,43
4000	14,234	6	40,00	0,42	16,80	0,42
4200	14,112	3	39,00	0,42	16,38	0,42

4. Результаты эксперимента

Результаты измерений, полученные с использованием вышеописанной методики, приведены в таблице 1.

В этой таблице в графах 3 и 7 приведены среднеарифметические ошибки. Произведенное сравнение среднеарифметических и среднеквадратичных ошибок для точек с наибольшим разбросом показало, что эти значения близки, и использование нормального закона распределения ошибок допустимо.

Из таблицы 1 видно также, что погрешность в измерении частоты не превышает $\pm 0,025\%$. Погрешность в измерении относительной величины амплитуды определяется точностью измерения изображения на экране осциллографа и лежит в пределах $\pm 2,5\%$. При определении абсолютной величины амплитуды следует учитывать погрешность коэффициента пересчета $\frac{\Delta K_{\text{ос}}}{K_{\text{ос}}} = +6\%$, таким образом суммарная погрешность будет равна $\pm 8,5\%$.

В таблице II приведены результаты измерений амплитуды ускоряющего напряжения в функции времени при работе синхроциклотрона в нормальном режиме ускорения (графа 3) и при работе в.ч. системы без нагрузки пучком (графа 5). Из графы 6 таблицы видно, что нагрузка пучком в среднем на 15% понижает амплитуду ускоряющего напряжения.

Этот метод позволил проделать ряд измерений, которые раньше нельзя было произвести. Например, была измерена частота захвата частиц в процесс ускорения при различных величинах магнитного поля. Было установлено, что при максимальной частоте, имеющейся в диапазоне в.ч. генератора ($26,173 \pm 0,037$) Мгц частота захвата при токе в обмотке основного магнита 4300 а, соответствующем полю в центре магнита 1,6825 тл, равна ($25,590 \pm 0,010$) Мгц.

Нижняя частота в диапазоне в.ч. генератора равна ($13,768 \pm 0,004$) Мгц, в то время как нижняя частота, необходимая для вывода протонов, равна ($14,067 \pm 0,006$) Мгц при токе в обмотке основного магнита 4020 а и - ($14,186 \pm 0,006$) Мгц при токе - 4300 а.

Нижняя частота при растяжке пучка ускоренных частиц равна ($14,864 \pm 0,049$) Мгц. Разброс в значении частоты определяется необходимостью получать ту или иную форму пучка в зависимости от проводимого эксперимента. Точность измерения частоты та же, что и в предыдущих случаях. Ток в обмотке основного магнита - 4230 а.

Т а б л и ц а П

t мксек	Λ_1 мм	U_{d1} кВ	Λ_2 мм	U_{d2} кВ	$\frac{U_{d2}}{U_{d1}}$	K_{∞}
100	25	15,50	25	15,50	1,00	0,62
150	27	16,74	28	17,36	1,04	0,62
200	29	17,98	30	18,60	1,03	0,62
400	29	17,98	30	18,60	1,03	0,62
600	27	15,66	30	17,40	1,11	0,58
800	27	17,01	29	18,27	1,07	0,63
1000	29	18,56	31	19,84	1,07	0,64
1200	33	20,13	36	21,96	1,09	0,61
1400	32	17,92	37	20,72	1,15	0,56
1600	30	16,20	34	18,36	1,13	0,54
1700	26	13,78	32	16,96	1,23	0,53
1800	27	14,04	32	16,64	1,18	0,52
1900	25	12,75	31	15,81	1,24	0,51
2000	29	14,50	33	16,50	1,14	0,50
2400	33	16,17	39	19,11	1,18	0,49
2600	31	14,88	37	17,76	1,19	0,48
2800	2 6	12,22	32	15,04	1,23	0,47
2900	27	12,69	33	15,51	1,22	0,47
3000	25	11,50	30	13,80	1,20	0,46
3100	27	12,15	30	13,50	1,11	0,45
3200	24	10,80	32	14,40	1,33	0,45
3400	29	12,76	35	15,40	1,21	0,44
3600	29	12,76	34	14,96	1,17	0,44
3800	30	12,90	34	14,62	1,13	0,43
4000	27	11,34	30	12,60	1,11	0,42
4200	28	11,48	31	12,71	1,11	0,41
4400	22	9,02	40	16,40	1,82	0,41
4500	30	12,00	30	12,00	1,00	0,40

На графиках рис. 6 представлены амплитудные характеристики в.ч. системы, снятые в динамическом (а,в) и статическом (б) режимах. Из сравнения графиков (а и б) видно, что даже на частоте 16,0 Мгц, где имеется максимальное расхождение в значениях динамической (а) и статической (б) характеристик, оно не превышает 7,3%, т.е. лежит в пределах точности измерений. Следует отметить, что точность измерения абсолютного значения амплитуды ускоряющего напряжения в статическом режиме та же, что и в динамическом, т.к. в пересчетный коэффициент для определения напряжения на дуанте входят те же частотные характеристики кабелей (рис. 7) и коэффициент делений емкостного делителя, а суммарная точность измерения анодного напряжения и напряжения делителя на пульте управления не превышает точности измерения изображения на экране осциллографа.

Сравнение частотных характеристик (рис.8), снятых в статическом и динамическом режимах, показывает, что расхождение по частоте не превышает ± 100 кгц, что лежит в пределах точности измерения статической характеристики волномером типа 513.

В ы в о д ы

1. Была снята динамическая амплитудно-частотная характеристика в.ч. системы синхроциклотрона с точностью не хуже, чем при снятии статической с максимальным использованием стандартной аппаратуры.

2. Точность определения абсолютной величины амплитуды составляет $\pm 8,5\%$, относительной $\pm 3\%$, частоты $\pm 0,025\%$ и времени $\pm 0,06\%$.

3. Разработанная методика а) позволяет учесть влияние реальной нагрузки пучком и нелинейности характеристик в.ч. генератора на амплитуду и частоту ускоряющего напряжения на дуанте; б) дает возможность снимать чисто ускорительные параметры в.ч. системы, такие, как частота и амплитуда ускоряющего напряжения на захвате или выводе протонов; в) помогает получить данные для определения суммарной амплитуды бетатронных и радиально-фазовых колебаний^{8/}; г) позволяет сравнивать различные режимы в.ч. системы при ее перестройке с интенсивностью и

объективно контролировать наличие рабочего диапазона амплитуд ускоряющего напряжения в функции частоты, что нельзя сделать никакими статическими методами.

Снятие динамической характеристики с интервалом 100 мксек производится одним оператором с пульта управления за 1,5 часа.

Недостатком метода является отсутствие калиброванных меток времени, позволяющих делить период модуляции на равное число частей. Это затрудняет сравнение характеристик, снятых в функции частоты модуляции.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность ст. инженеру Б.Н.Марченко за полезную дискуссию и инженерам В.И.Иванову и Н.П.Сеченову за активное участие в монтаже, настройке и измерениях.

Л и т е р а т у р а

1. D.Bohm and L.Foldy. *Phys. Rev.*, 72, 649 (1947).
2. В.И.Данилов, И.Б.Енчевич, и др. Труды международной конференции по ускорителям, 21-27 августа 1963 г., Дубна, стр. 505. Атомиздат, Москва, 1964.
3. А.Л.Милиц, И.Х.Невяжский, Б.И.Поляков. "Радиотехника и электроника", т.1, вып. 7, стр.893-903, 1956.
4. С.М.Рубчинский, А.А.Васильев, В.Ф.Кузьмин, Н.И.Федоренко. "Радиотехника и электроника", т.1, вып. 7, стр 986-1000, 1956.
5. Т.Н.Томилина. Препринт ОИЯИ Б1-1986, Дубна, 1958.
6. М.П.Костенко. Электрические машины, стр. 543, Ленэнергоиздат, 1949.
7. В.И.Данилов, И.Б.Енчевич, М.М.Кулюкин, Э.А.Полферов, Т.Н.Томилина. Препринт ОИЯИ Р-2811, Дубна, 1966.
8. В.И.Данилов, И.Б.Енчевич, Э.А.Полферов, Е.И.Розанов, А.Н.Сафонов. Препринт ОИЯИ Р9-3968, Дубна, 1968.

Рукопись поступила в издательский отдел

11 июля 1968 года.

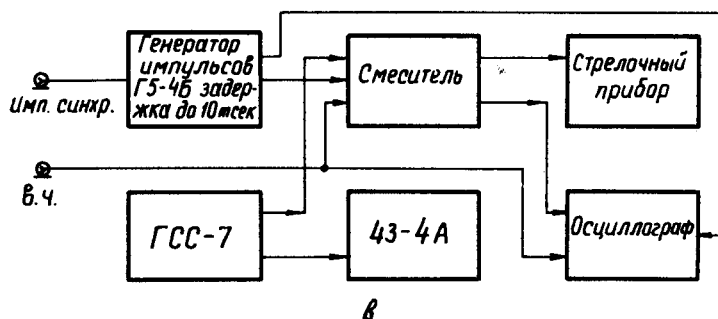
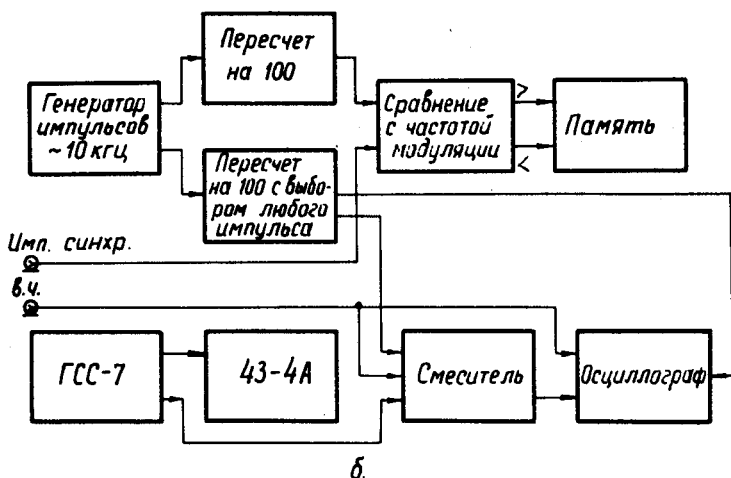
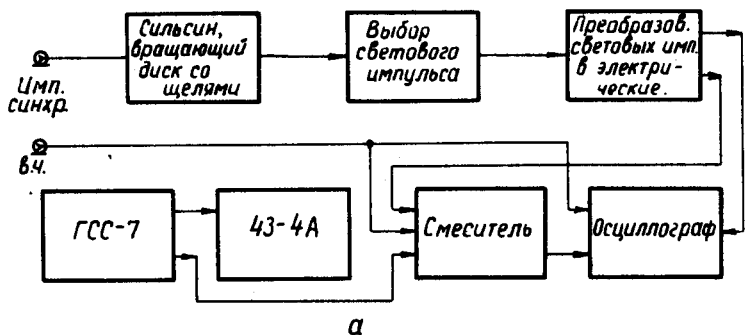


Рис. 1. Блок-схема для измерения динамической амплитудно-частотной характеристики: а) для формирования стробирующих импульсов используется фотоустройство и диск со щелями; б) стробирующие импульсы формируются из импульсов генератора, работающего на частоте в 100 или 1000 раз выше частоты модуляции; в) в качестве стробирующих импульсов используются импульсы с выхода стандартного генератора Г5-4Б.

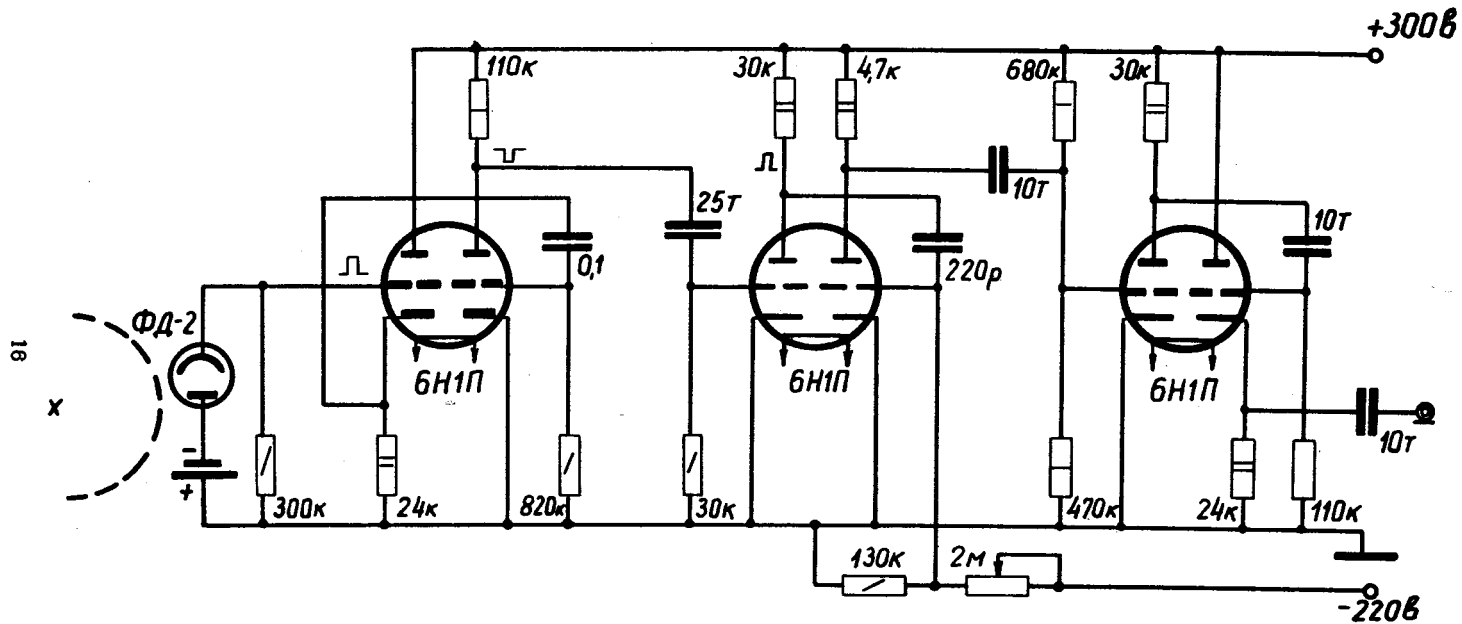


Рис. 2. Схема формирования стробирующего импульса из светового сигнала.

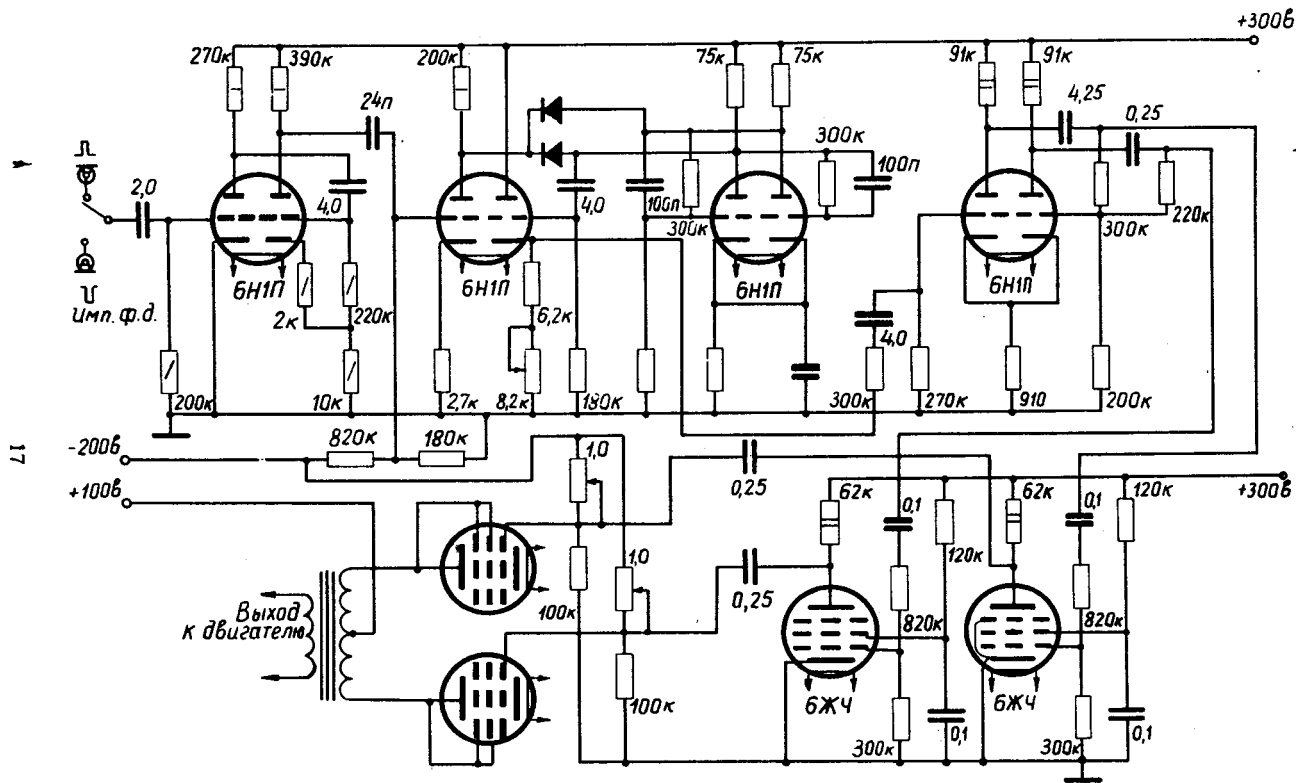


Рис. 3. Схема питания сильсина импульсами фотодатчика, идущими с частотой модуляции.

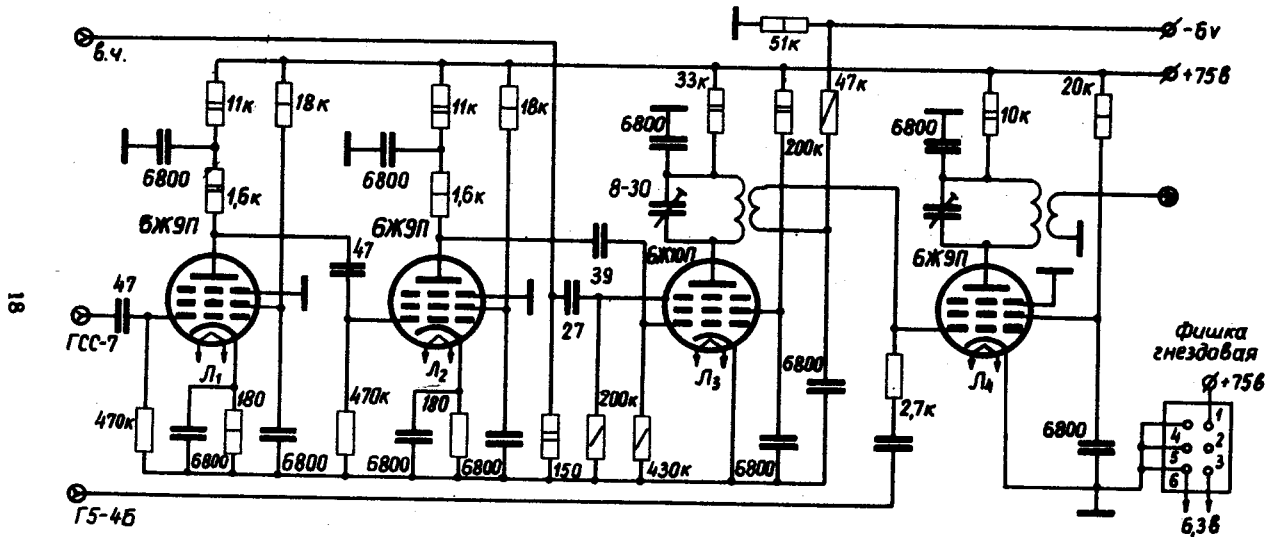


Рис. 4. Схема смесительного блока.

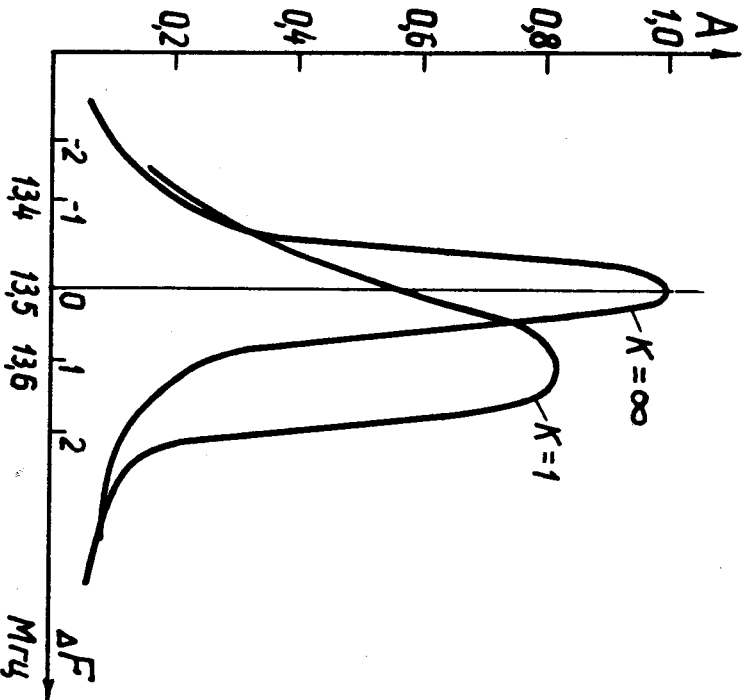


Рис. 5. Резонансные характеристики анодной контура смесителя а) статическая ($K = \infty$); б) динамическая ($K = 1$).

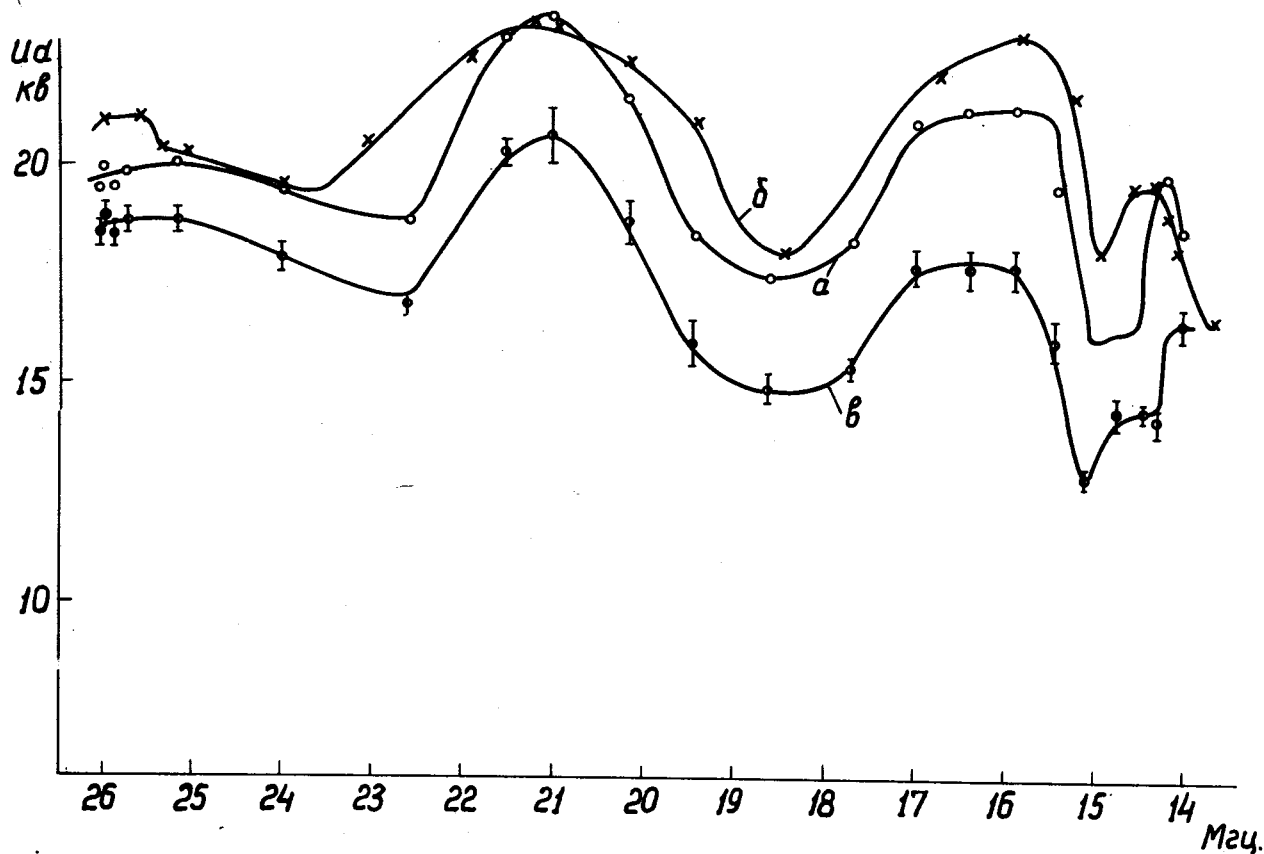


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики в.ч. системы а) динамическая без нагрузки в.ч. системы пучком (U_{a2}); б) статическая без нагрузки в.ч. системы пучком; в) динамическая с нагрузкой в.ч. системы пучком ускоряемых частиц (U_{a1}).

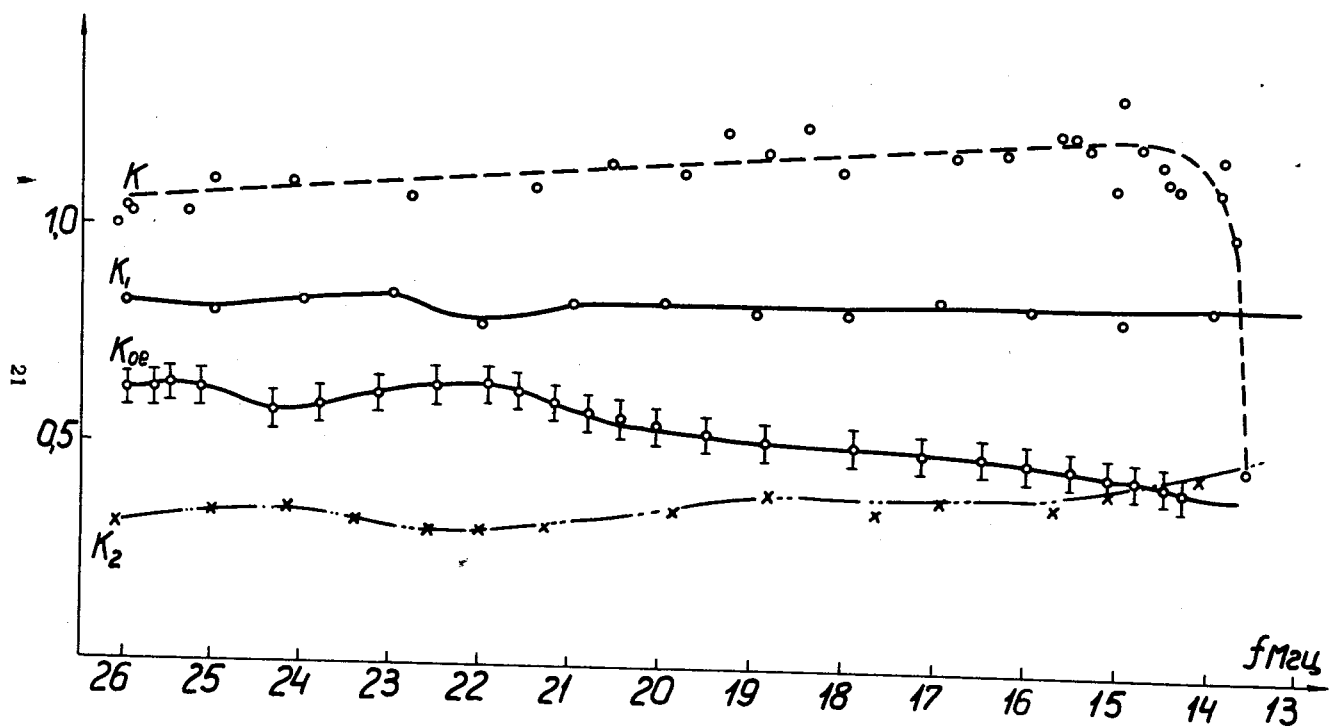


Рис. 7. Частотные характеристики: $K_1 = \phi_1(f)$ для отрезка кабеля $l_1 = 25$ м;
 $K_2 = \phi_2(f)$ для отрезка кабеля $l_2 = 450$ м;

$$K_{oo} = \frac{U_d / \text{кВ} /}{\Lambda_{\text{осц}} / \text{мм} /} ; \quad K = \frac{U_{d2}}{U_{d1}}$$

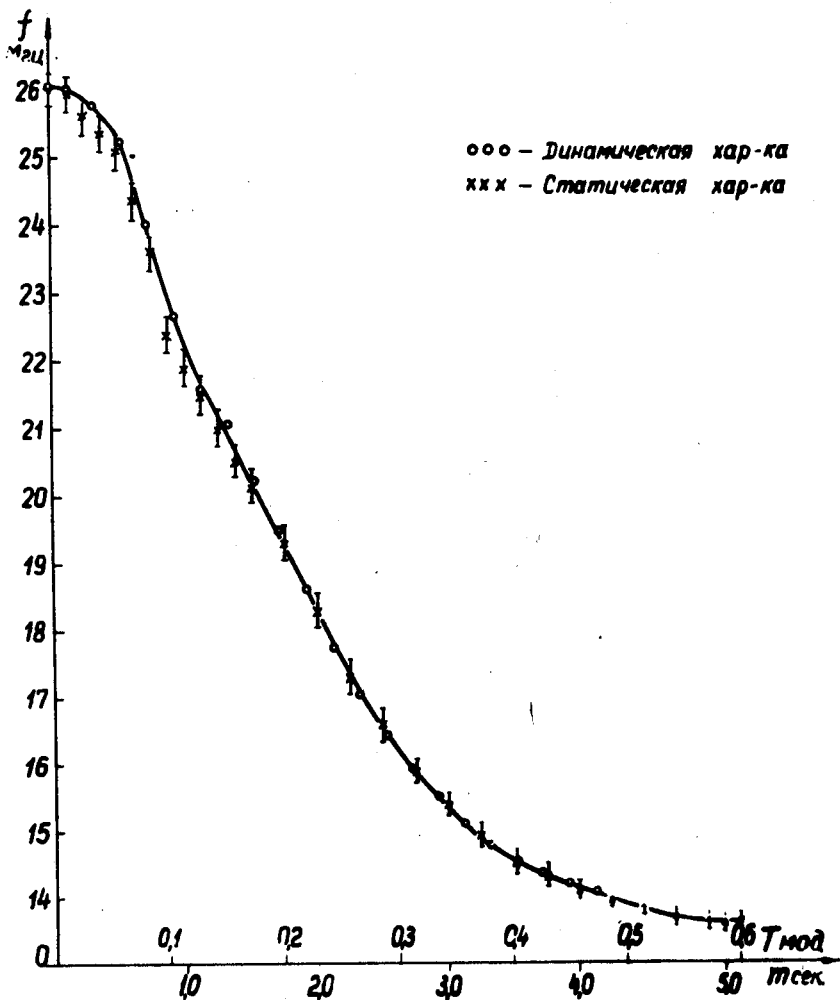


Рис. 8. Частотная характеристика в.ч. системы в функции от времени (нижняя шкала по оси абсцисс) и угла поворота вариатора (верхняя шкала по оси абсцисс).