

С345Г
Г-524

755/78

+

Глазов А.А. и др.

Б1-9-11181.



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б 1-9-11181

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

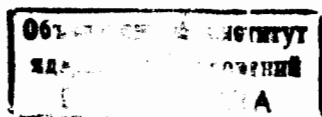
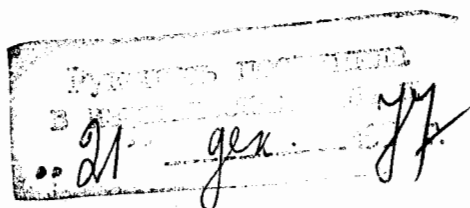
Лаборатория ядерных проблем

Глазов А.А., Данилов В.И., Денисов Ю.Н., Марченко Б.Н.,
Онищенко Л.М., Осадченко Ю.Н., Розанов Е.И., Сафонов А.Н.,
Томилина Т.Н., Шестов А.В.

Б1-9-11181

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОЦИКЛОТРОНА ОИЯИ

ЗА ПЕРИОД 1973 + 1976 г.г.



Дубна, 1977

АННОТАЦИЯ

Сравниваются характеристики синхроциклотрона ОИЯИ на 680 МэВ при вариаторе с рабочим ходом 0,4 периода модуляции и при новом вариаторе с рабочим ходом 0,6 и повышенной частотой модуляции.

Путем последовательных конструктивных изменений в вариаторе с увеличенным рабочим ходом улучшены амплитудно-частотные характеристики в.ч. системы и уменьшены фазовые потери при ускорении пучка. В эксплуатационном режиме ток внутреннего пучка составляет 3-4 мкА.

Г. Введение.

В 1962 году интенсивность внутреннего пучка синхроциклотрона ОИЯИ была увеличена с 0,3 до 1,2 мкА^{/1/} благодаря некоторым конструктивным изменениям в.ч. системы.

Затем в 1963 году в центральной области ускорительной камеры были установлены фокусирующие электроды, увеличивающие вертикальную фокусировку пучка в течение времени захвата ионов в режим ускорения^{/2/}. Это дало повышение интенсивности с 1,2 до 2,3 мкА.

В 1973 году был изготовлен новый вариатор, форма статорных пакетов и роторных лопаток которого была специально рассчитана, чтобы получить частотную программу, близкую к частотной программе старого вариатора, но имеющую увеличенное отношение рабочей части периода модуляции к нерабочей^{/3/}. Новый вариатор был установлен на синхроциклотроне в сентябре 1973 г. Сразу после установки нового вариатора было зафиксировано увеличение интенсивности пучка ускоренных протонов примерно в два раза. Однако, ухудшение контактов в роторе с течением времени привело к увеличению высокочастотных потерь, ухудшению амплитудной характеристики высокочастотного напряжения и, как следствие, к увеличению фазовых потерь и уменьшению тока пучка. Невозможность скорректировать амплитудную характеристику (из-за отсутствия модулятора анодного напряжения) привела к необходимости корректировать (для устранения фазовых потерь) частотную характеристику за счет внесения изменений в конструкцию вариатора.

Ниже описываются этапы этой работы.

2. Основные характеристики синхроциклотрона ОИЯИ перед заменой вариатора (до 18 сентября 1973г.)

Перед установкой вариатора новой конструкции было изучено влияние основных параметров ускорителя на величину тока пучка*.

На рис.1 показаны характеристики высокочастотной системы - зависимость частоты f от времени t и зависимости производной частотной программы по времени $f' = \frac{df}{dt}$ и ускоряющего напряжения на дуанте U_d от частоты f .

Зависимости f и f' измерялись прибором, описание которого и методика измерений даны в работе^{/4/}. Измерение амплитуды ускоряющего напряжения производилось косвенным методом при помощи пересчета продетектированного напряжения с емкостного делителя, установленного внутри камеры ускорителя. Кривая намагничения магнита синхроциклотрона показана на рис.2, где также приведена зависимость частоты обращения протонов в центре от тока магнита. На рис.3 изображены зависимости частоты обращения ионов от радиуса орбиты.

На рис.4 показаны рассчитанные в зависимости от радиуса орбиты косинус равновесной фазы $\cos \psi_s$ и максимально допустимый косинус равновесной фазы, определяемый из условий затухания фазовых колебаний, $\cos \psi_{sgon}$. (Методика расчета $\cos \psi_s$ и $\cos \psi_{sgon}$ приведена в ⁵ /). На радиусах, где $\cos \psi_s > \cos \psi_{sgon}$ возможны потери частиц из-за нарушения режима автофазировки (фазовые потери).

При расчетах $\cos \psi_s$ и $\cos \psi_{sgon}$ частота захвата принималась равной $f_0 = 25,52$ МГц, что соответствует напряженности магнитного

*Таблица зависимости основных параметров синхроциклотрона от радиуса приведена в приложении.

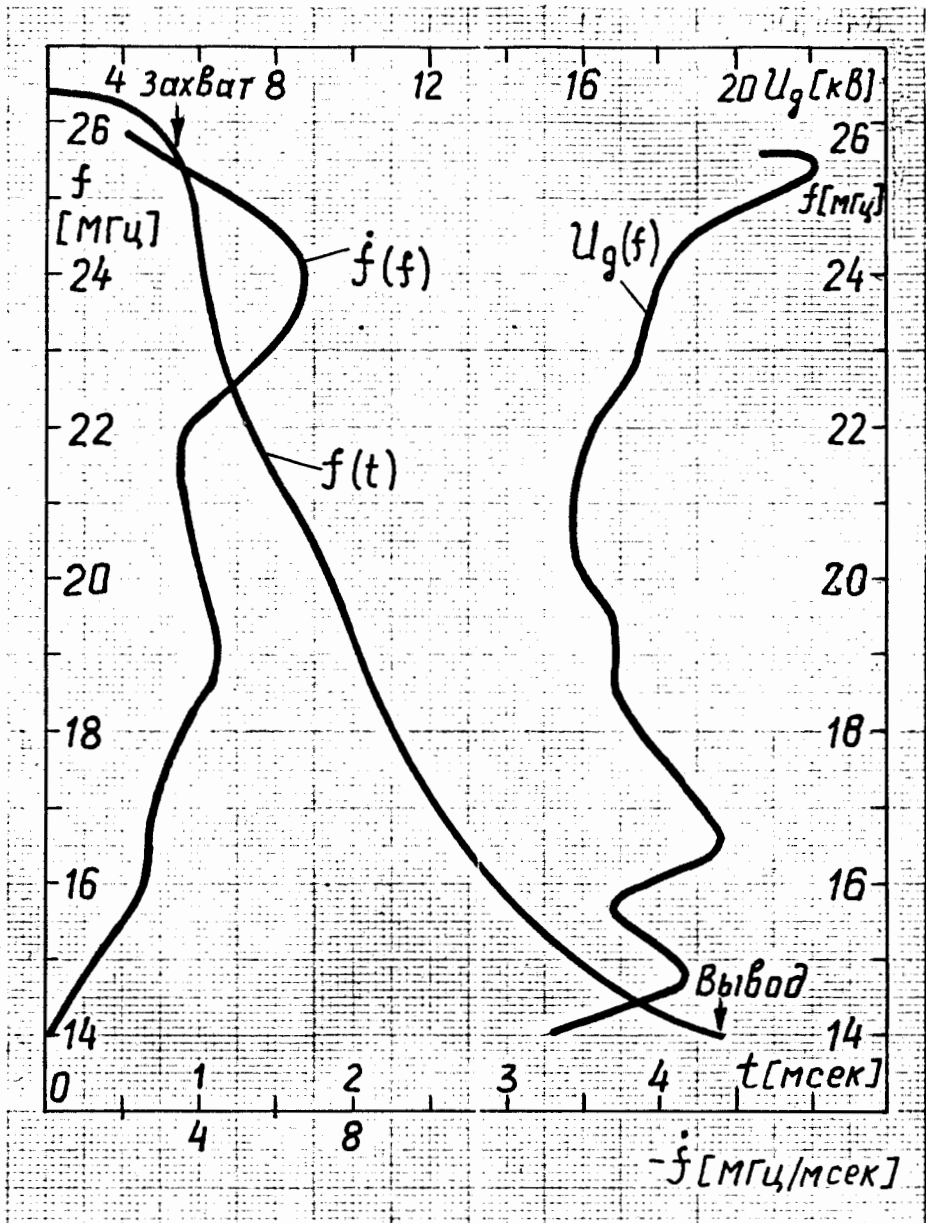


Рис. 1 . Характеристики в.ч. системы синхrocиклотрона с вариатором старой конструкции (II.9.73) при $E_a = 7,2$ кВ, $F_M = 113$ Гц, $\frac{t_{yc}}{T_M} = 0,41$; U_g на захвате равно $U_{g0} = 3,12 E_a$.

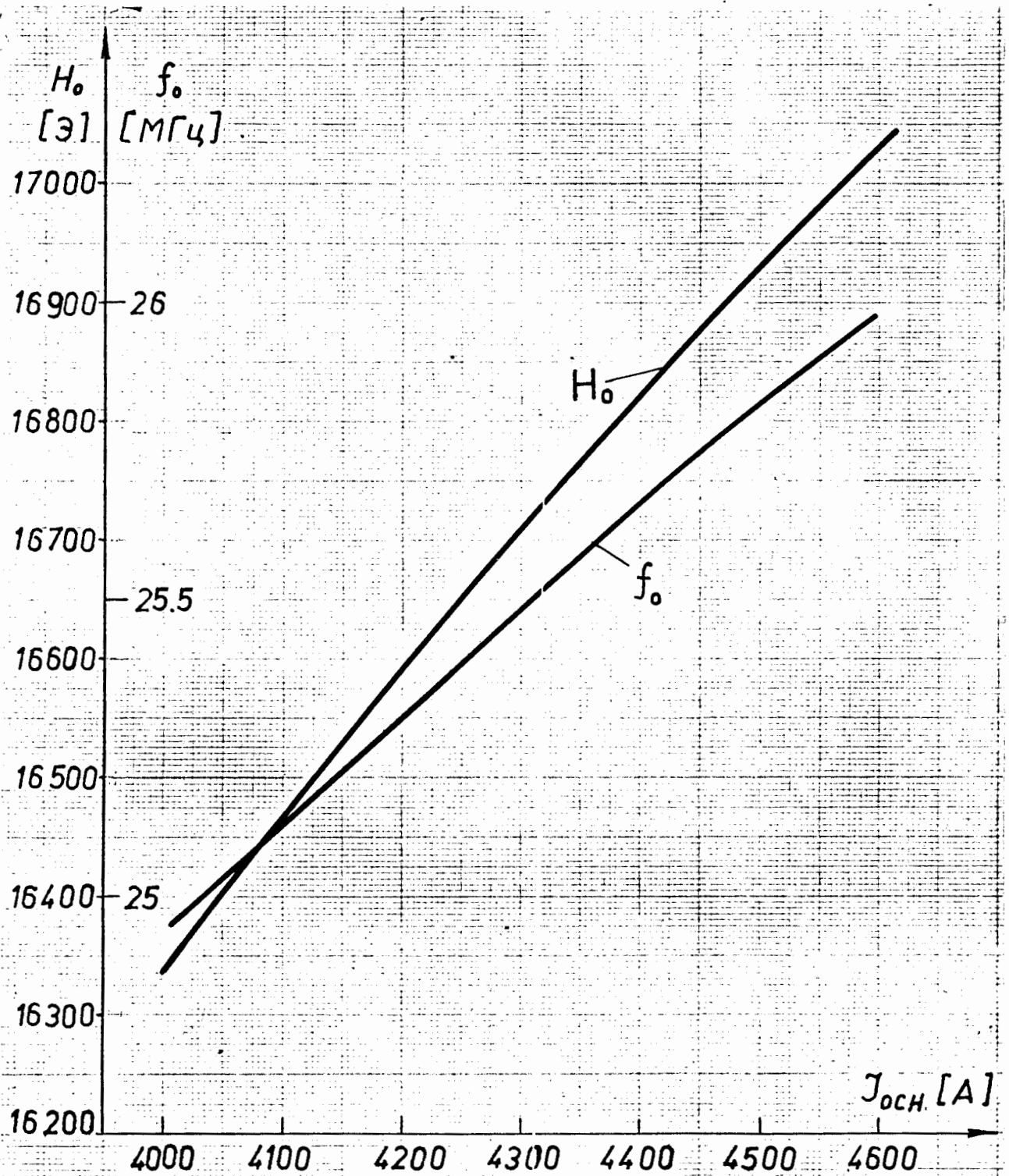


Рис. 2 . Зависимости магнитного поля и частоты обращения в центре от основного тока магнита при $I_{под} = 260$ А .

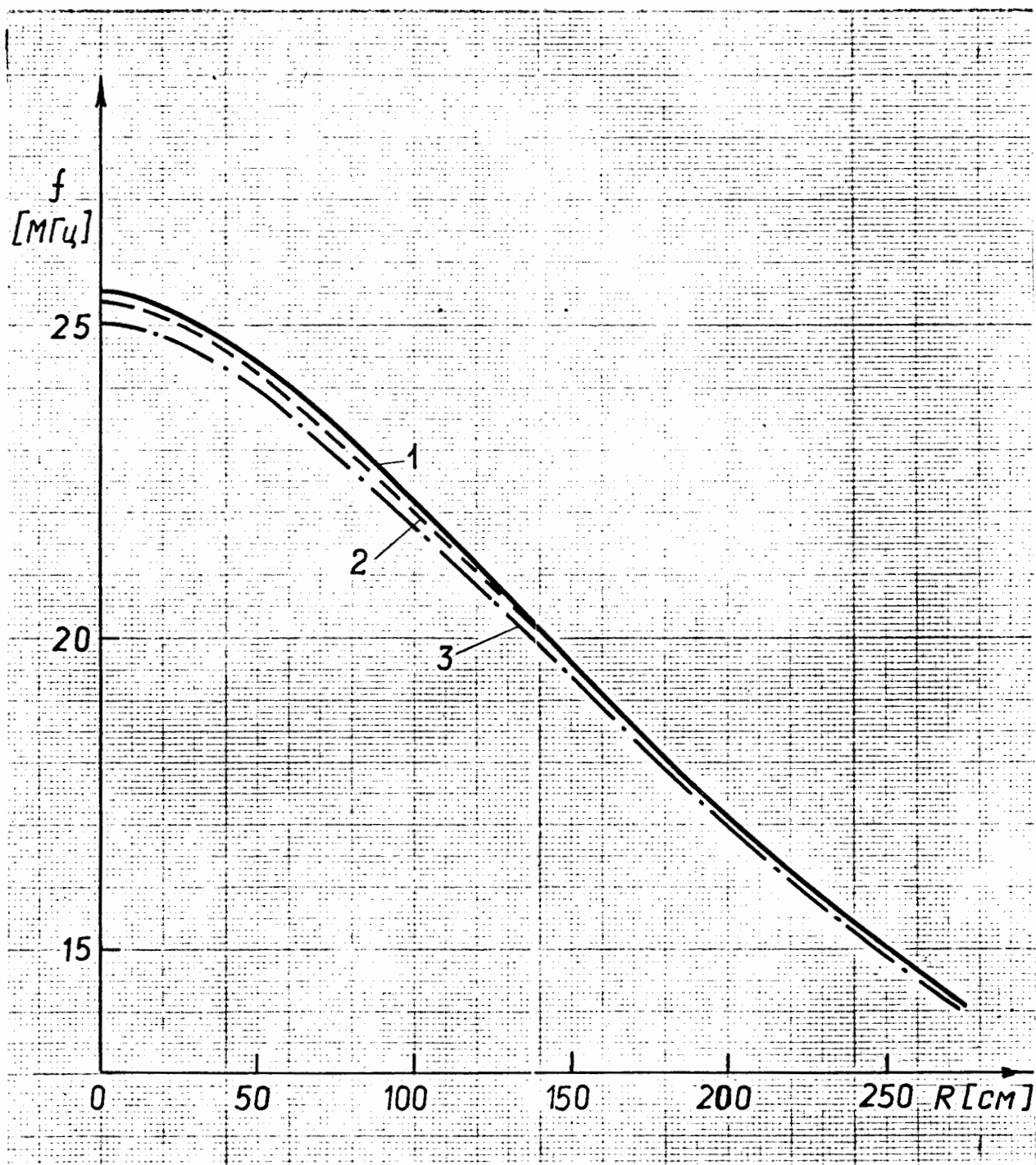


Рис. 3 . Зависимости частоты обращения от радиуса орбиты для: 1- $H_0 = 16730 \text{ Э}$ ($J_{\text{осн}} = 4320 \text{ А}$), 2- $H_0 = 16630 \text{ Э}$ ($J_{\text{осн}} = 4235 \text{ А}$), 3- $H_0 = 16390 \text{ Э}$ ($J_{\text{осн}} = 4040 \text{ А}$) (без учета изменения формы кривой $N/N_0 = N(z)/N_0$).

поля в центре $H_0 = 16730$ Э при токе в основной обмотке магнита $J_{осн} = 4320$ А и токе подпитки (для коррекции медианной поверхности вблизи конечных радиусов ускорения) $J_{под} = 260$ А.

Анализ рисунков 1 и 4 показывает, что наличие максимума в зависимости $f = f(f)$ приводит к фазовым потерям ускоряемых частиц на радиусах от 40 до 90 см. На радиусах 160–180 см также имеют место фазовые потери, которые могут вызываться уменьшением амплитуды ускоряющего напряжения на частоте 15,7 МГц при достаточно большой величине производной на этой частоте.

На рис. 5 приведены зависимости α_H – суммарной интенсивности вторичных частиц (нейтронов, мезонов и др.), генерируемых бериллиевой мишенью, установленной в камере ускорителя на радиусе $R_M = 274,5$ см при соударении с ней ускоренных протонов. Интенсивность регистрировалась ионизационной камерой "Н" типа "Кактус". Зависимость интенсивности α_H на первом графике показана в функции напряжения на фокусирующих электродах $U_{\phi}^{1/2}$, на втором – в функции тока основной обмотки магнита $J_{осн}$, на третьем – в функции тока подпитки $J_{под}$.

Наличие плато в зависимости $\alpha_H = \alpha_H(U_{\phi})$ с ростом U_{ϕ} может быть объяснено экранировкой плазмы ионного источника возрастающим пространственным зарядом пучка, в результате чего уменьшается и затем прекращается отсос ионов в ч. напряжением из источника ^{/6/}. Последующий спад пучка, по видимому, вызван дрейфом ускоряемых протонов в направлении, перпендикулярном электрическому полю и прецессий их в спадающем магнитном поле. При этом эффективность вертикальной фокусировки за счет электростатического поля, создаваемого фокусирующими электродами, остается сначала примерно постоянной, а затем уменьшается и даже может сменить знак ^{/7/}.

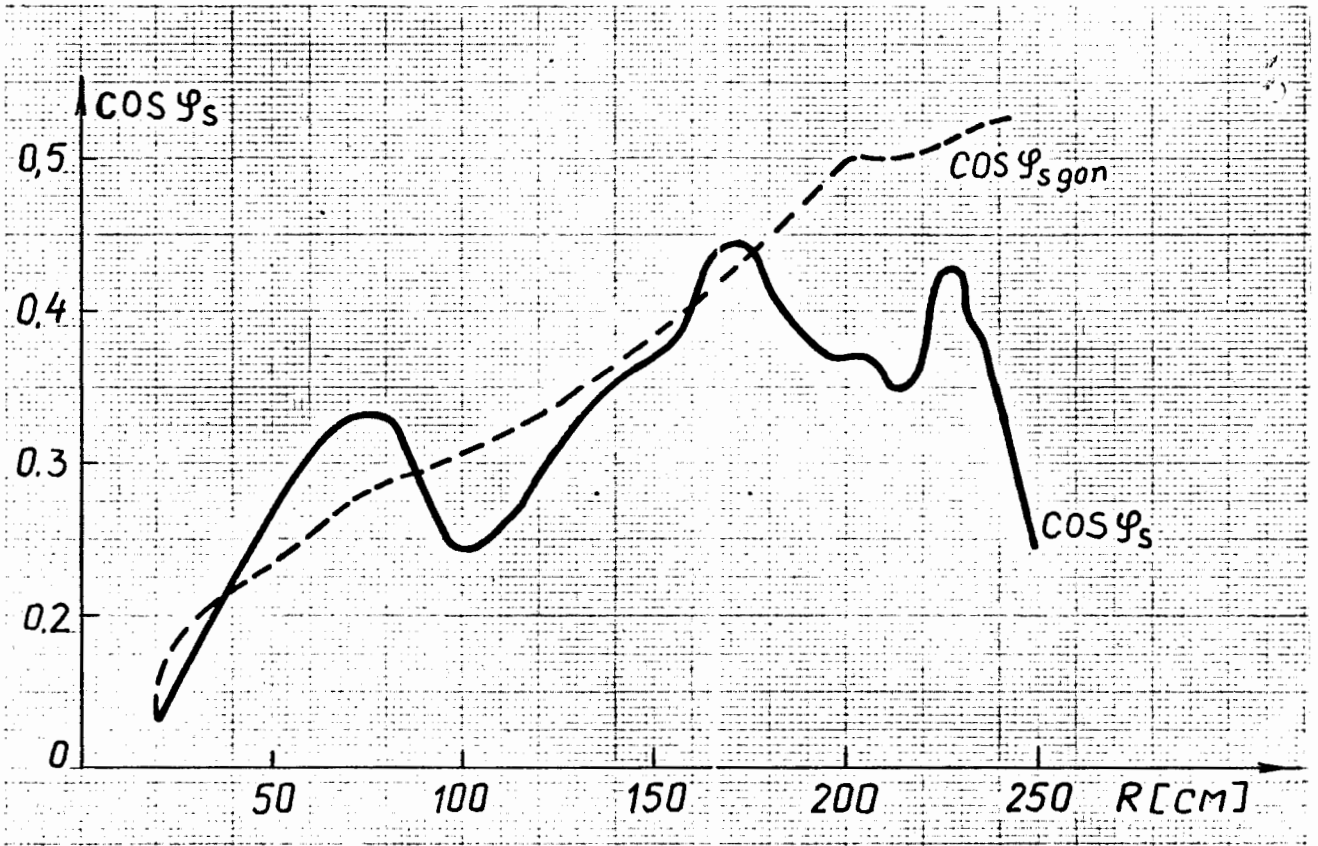


Рис. 4. Зависимость $\cos \varphi_s$ и $\cos \varphi_{s \text{ gon}}$ от радиуса с вариатором старой конструкции (II.9.73) при $f_o = 25,52$ МГц, $E_a = 7,2$ кВ, $U_{go} = 22,5$ кВ, $F_m = 113$ Гц, $\dot{f}_o = -3 \frac{\text{МГц}}{\text{мсек}}$.

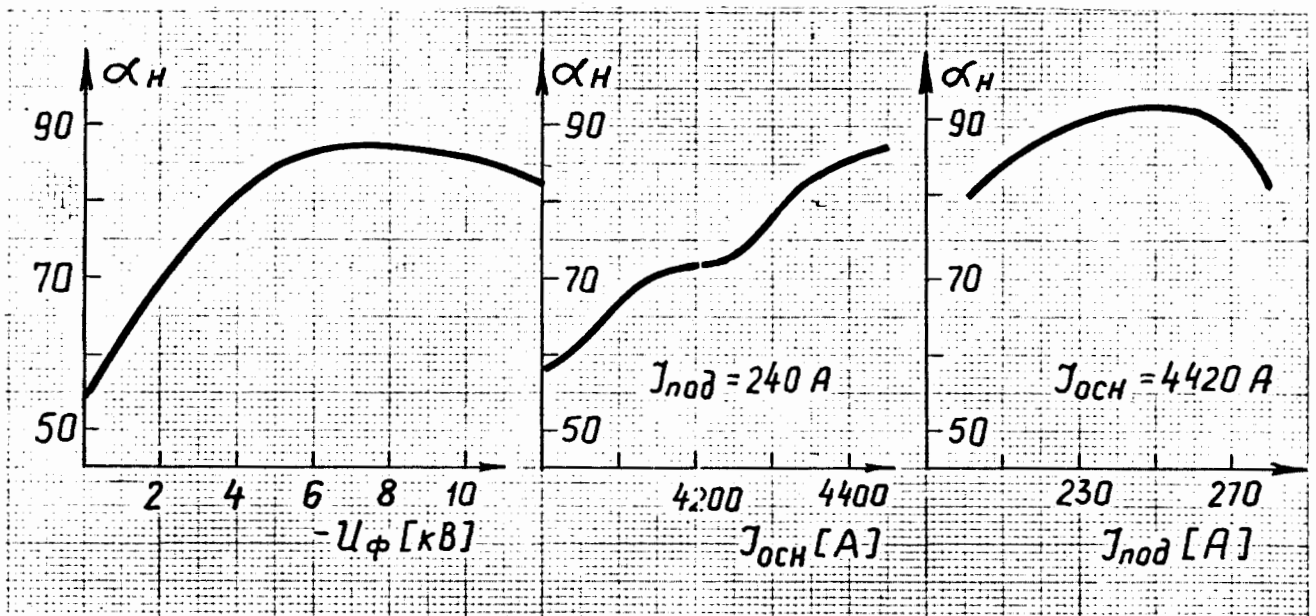


Рис. 5. Зависимости интенсивности от U_ϕ , $J_{осн}$ и $J_{под}$ с вариатором старой конструкции (II.9.73) при $U_{go} = 22,5$ кВ, $E_a = 7,2$ кВ, $F_m = 113$ Гц, $\dot{f}_o = -3$ МГц/мсек, $R_m = 274,5$ см, $U_\phi = -7$ кВ.

Рост интенсивности на втором графике рис.5 при возрастании основного тока магнита $I_{осн.}$ может быть объяснен увеличением спада магнитного поля на радиусах, больших 200 см ^{В/}.

Следует иметь ввиду, что с ростом основного тока магнита увеличивается частота захвата и в соответствии с кривой частота-время уменьшается производная на захвате \dot{f}_0 и увеличивается время захвата. Это приводит к увеличению эффективности захвата $\epsilon = \frac{t_{зах}}{T_M}$, где $t_{зах} = \frac{\Delta f_{зах}}{\dot{f}_0}$, а $\Delta f_{зах}$ - диапазон захватываемых частот.

При этом интенсивность увеличивается до тех пор, пока $\Delta f_{зах}$ не начнет значительно уменьшаться вследствие возвращения частиц к центру и потери их из-за рассеяния на атомах остаточного газа / 9 /. Кроме того, увеличение $I_{осн.}$ приводит к уменьшению $\cos \varphi_s$ на захвате ($r = 20$ см), поэтому возрастает вероятность фазовых потерь при росте $\cos \varphi_s$ с радиусом. Уменьшение $\cos \varphi_s$ на захвате увеличивает также амплитуду радиально-фазовых колебаний и энергетический разброс частиц в пучке. Необходимо учитывать изменение ускоряющего напряжения на захвате U_{g0} в зависимости от частоты захвата (обычно U_g увеличивается с ростом частоты захвата). Рабочий режим выбран при токе $I_{осн.} = 4420$ А из условия допустимой тепловой нагрузки обмоток основного магнита при длительной эксплуатации.

Наличие плато на зависимости $\alpha_H = \alpha_H(I_{под})$ (третий график рис.5) вызвано перераспределением магнитного потока на последних рабочих радиусах, приводящим к смещению медианной поверхности.

На рис.6 приведены зависимости интенсивности внутреннего пучка α_H от анодного напряжения в.ч.генератора E_a при постоянной частоте модуляции $F_M = 113$ Гц, а также зависимость

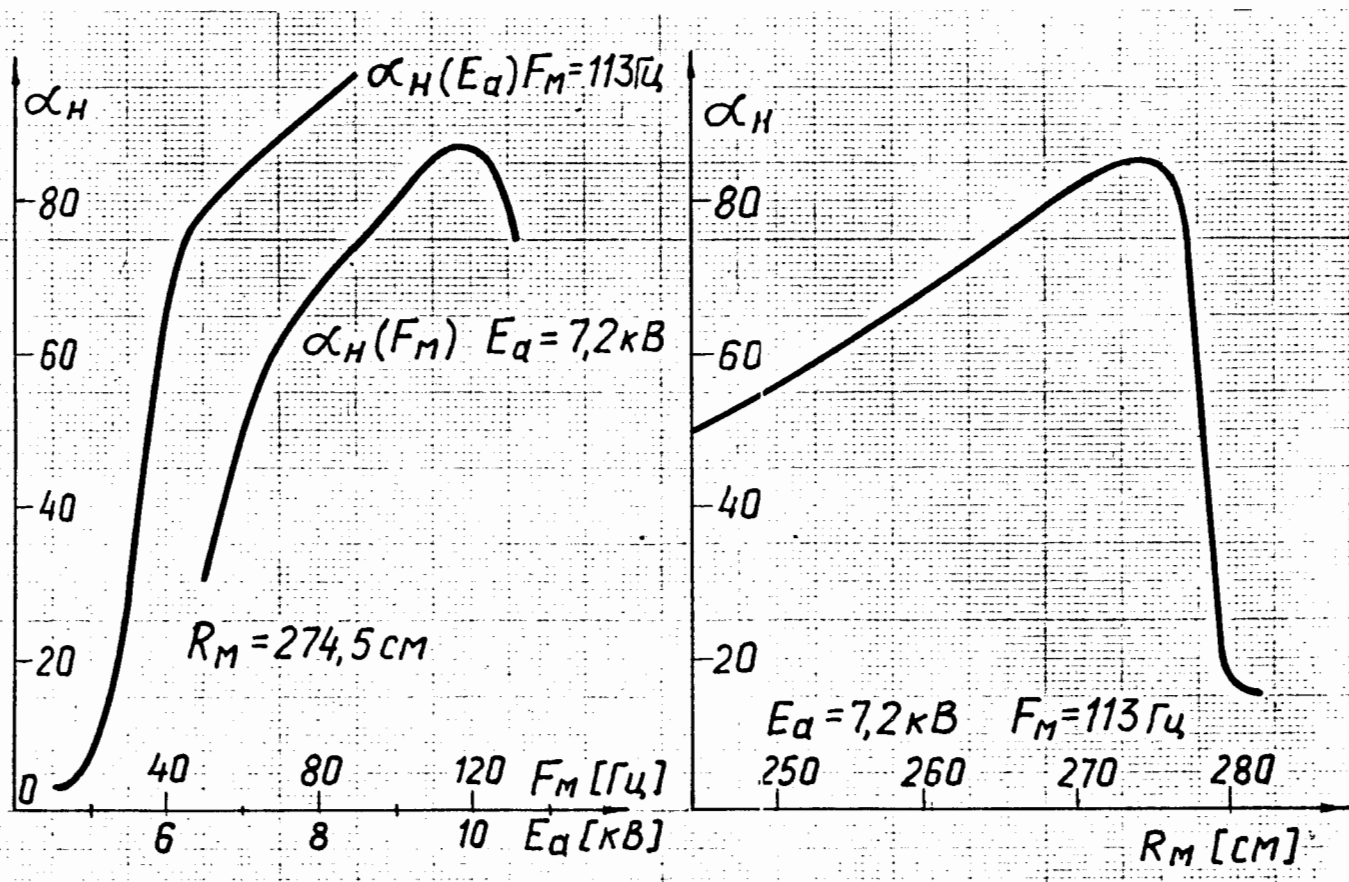


Рис. 6. Зависимости интенсивности от E_a , F_M и R_M с вариатором старой конструкции (II.9.73) при $U_{g0} = 3,12 \text{ В}_a$, $I_{осн} = 4420 \text{ А}$, $I_{под} = 240 \text{ А}$, $U_{\phi} = -7 \text{ кВ}$.

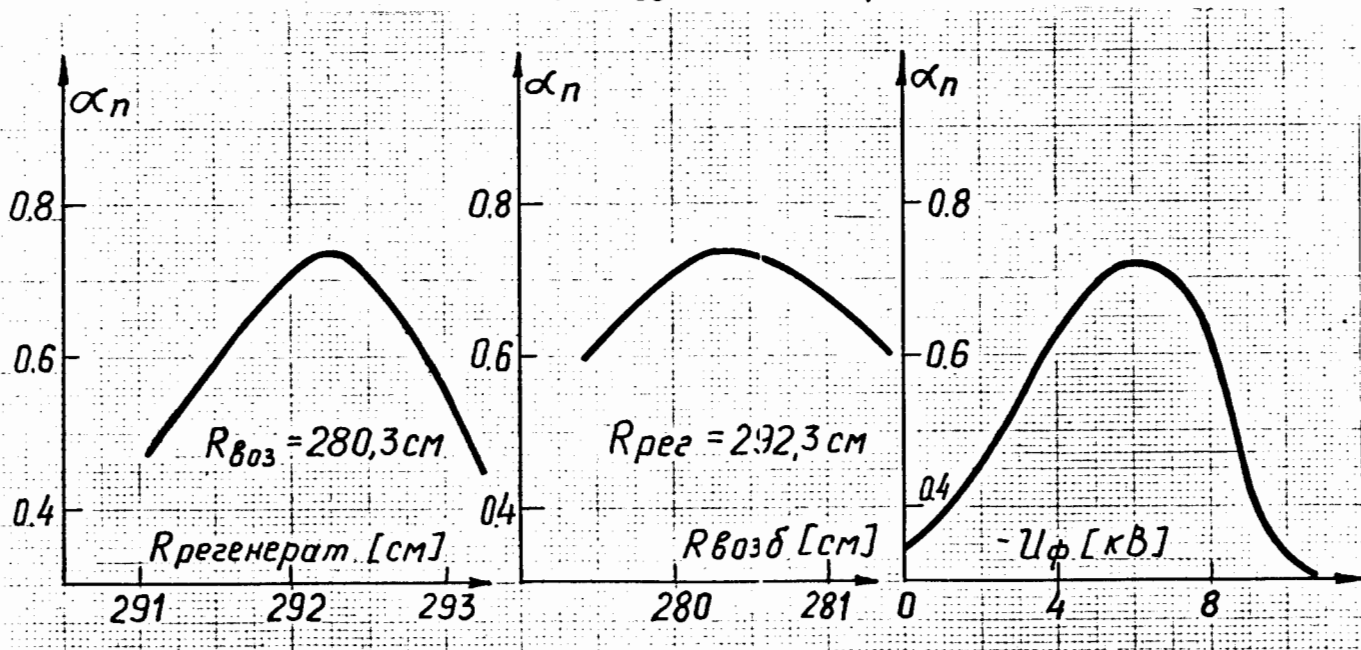


Рис. 7. Зависимости интенсивности выведенного пучка с вариатором старой конструкции от $R_{\text{рег}}$, $R_{\text{воз}}$ и U_{ϕ} при $I_{осн} = 4300 \text{ А}$, $I_{под} = 270 \text{ А}$, $U_{\phi} = -6 \text{ кВ}$, $U_{g0} = 22,5 \text{ кВ}$, $E_a = 7,2 \text{ кВ}$, $F_M = 113 \text{ Гц}$ (II.9.73).

$\alpha_H = \alpha_H(F_M)$ при постоянной амплитуде ускоряющего напряжения на захвате $U_{g0} = 22,5$ кВ, $E_{\alpha} = 7,2$ кВ). Особенностью кривой $\alpha_H = \alpha_H(F_M)$ является наличие максимума интенсивности при $F_M = 120$ Гц. При дальнейшем увеличении частоты модуляции и соответствующем возрастании f_0 потери частиц вследствие сужения области фазовой устойчивости превышают рост тока из-за увеличения числа импульсов ускоренных протонов в секунду, что приводит в целом к снижению интенсивности внутреннего пучка синхротрона.

На втором графике рис. 6 дана зависимость интенсивности, регистрируемой камерой "Н", от радиуса установки бериллиевой мишени. Из этого графика видно, что устойчивое ускорение протонов возможно до радиуса 277 см, а резкий спад тока обусловлен наличием неотщипмированной области магнитного поля в непосредственной близости от магнитного канала /8,10/, вход которого расположен на радиусе $R_K = 280$ см.

Возрастание регистрируемой интенсивности α_H при увеличении радиуса установки пробника с бериллиевой мишенью обусловлено как ростом выхода вторичных частиц при увеличении кинетической энергии протонов, так и изменением телесного угла пучка вторичных частиц, попадающего на ионизационную камеру "Н".

Измерения α_H - интенсивности выведенного протонного пучка производились ионизационным дозиметром "П", расположенным на выпускном окне ускорительной камеры. На рисунках 7 и 8 показано, как меняется α_H в зависимости от положения регенератора и возбуждителя, а также от напряжения U_{ϕ} , основного тока магнита и тока подпитки. Зависимость интенсивности от U_{ϕ} для выведенного протонного пучка имеет четко выраженный максимум. Это объяс-

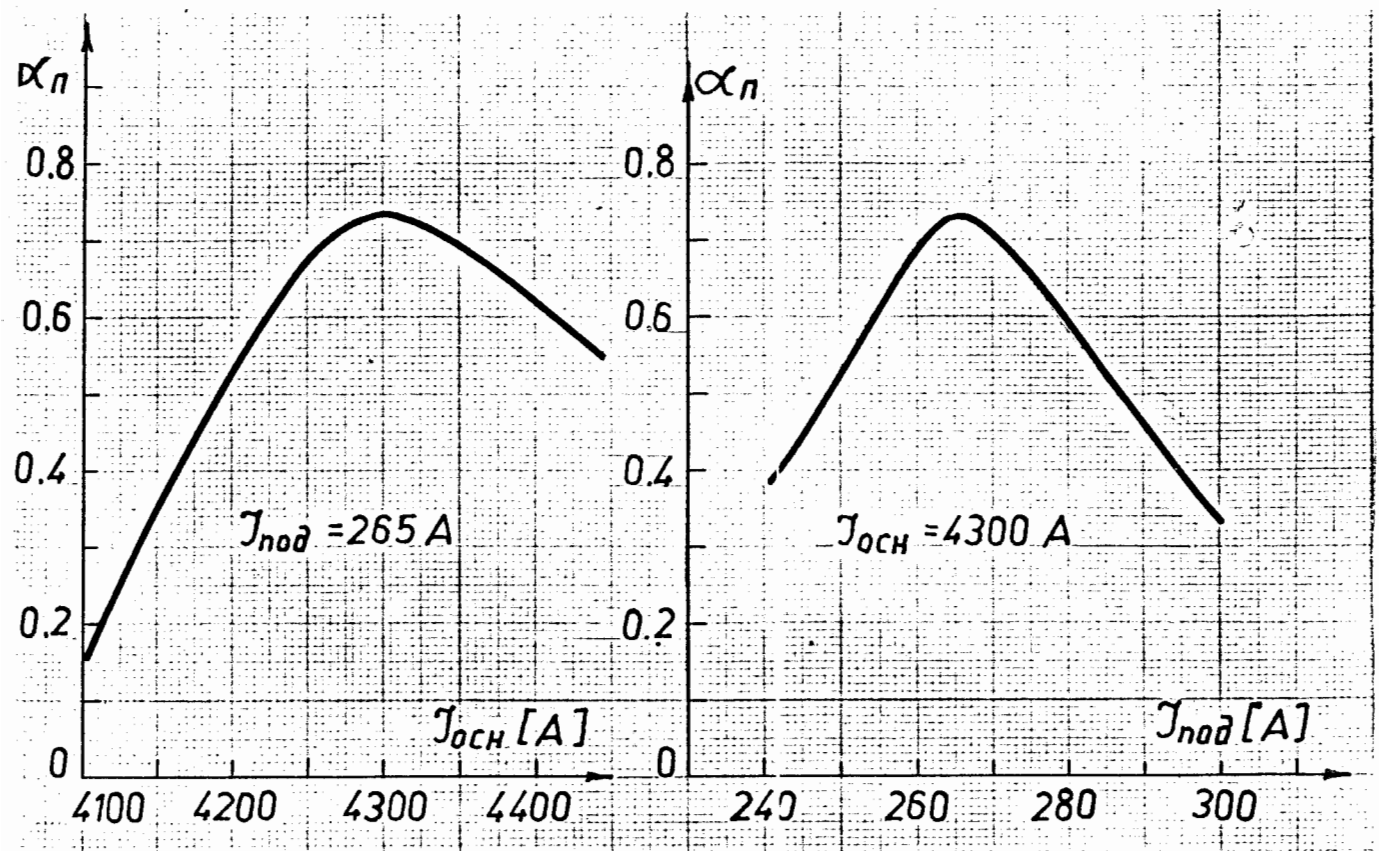


Рис. 8. Зависимости интенсивности выведенного пучка со старым вариатором (II.09.73) от $J_{осн}$ и $J_{под}$ при $U_{ф} = -7$ кВ, $U_{г0} = 22,5$ кВ, $E_{а} = 7,2$ кВ, $F_{м} = 113$ Гц, $R_{возб} = 280,3$ см, $R_{рег} = 292,3$ см.

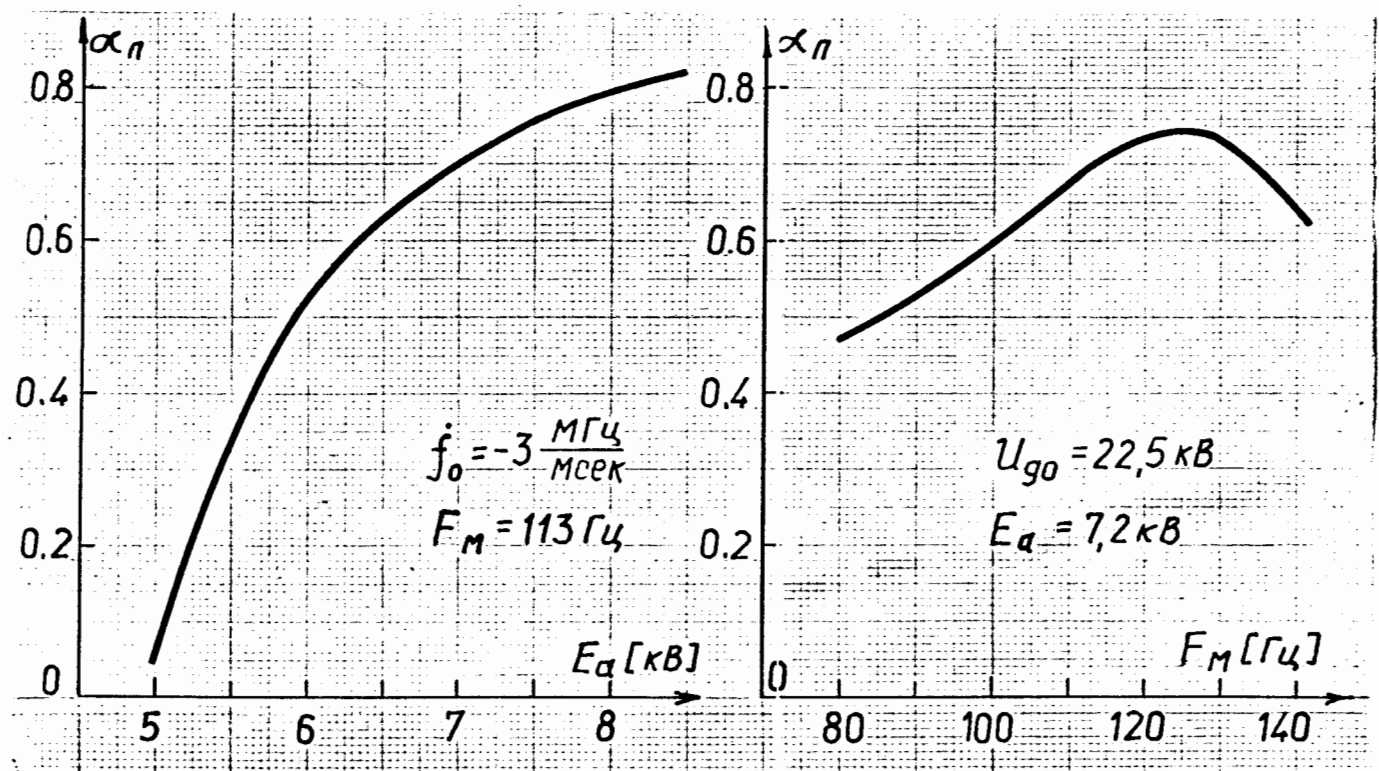


Рис. 9. Зависимости интенсивности выведенного пучка (II.9.73 - старый вариатор) от $E_{а}$ и $F_{м}$ при $J_{осн} = 4300$ А, $J_{под} = 265$ А, $U_{ф} = -7$ кВ, $U_{г0} = 3,12 E_{а}$.

няется, повидимому, тем, что с ростом фокусирующего напряжения не только увеличивается число удерживаемых в сгустке частиц, но и возрастают амплитуды свободных радиальных колебаний, из-за чего уменьшается эффективность вывода. На интенсивность внутреннего пучка рост амплитуд радиальных колебаний оказывает существенно меньшее влияние (см. рис. 5). После установки в 1970 г. нового магнитного канала /10/ эффективность вывода ускоренного пучка протонов составляет 10%. На рис. 9 показаны зависимости интенсивности $\alpha_n = \alpha_n(E_a)$ в режиме вывода протонов при постоянной частоте модуляции $F_M = 113$ Гц и от частоты модуляции $\alpha_n = \alpha_n(F_M)$ при постоянной амплитуде ускоряющего напряжения на захвате $U_{g0} = 22,5$ кВ. Максимум на кривой $\alpha_n = \alpha_n(F_M)$ также как и на рис. 6 для внутреннего пучка соответствует частоте модуляции около $F_M = 120$ Гц, а спад тока объясняется как и ранее увеличением фазовых потерь с ростом F_M .

При исследовании зависимости интенсивности от скорости подачи водорода в источник ионов было установлено, что при расходе газа $8 \text{ см}^3/\text{мин}$ и выше интенсивность как внутреннего пучка, так и пучка выведенных протонов, практически не меняется. На рис. 10 показана зависимость расхода газа от β - числа делений шкалы, на которые поворачивается кран натекателя, регулирующего скорость подачи газа в источник.

Для вычисления эффективности захвата в режим автофазировки, которая определяется как отношение времени захвата к периоду модуляции, было измерено время захвата ионов в процесс ускорения. Для этого передний фронт импульсов, включающих в.ч. генератор смещался по времени на дискретные интервалы по 10 мксек до тех пор, пока регистрируемая на конечном радиусе интенсивность пучка не снижалась от максимальной величины до нуля /11/.

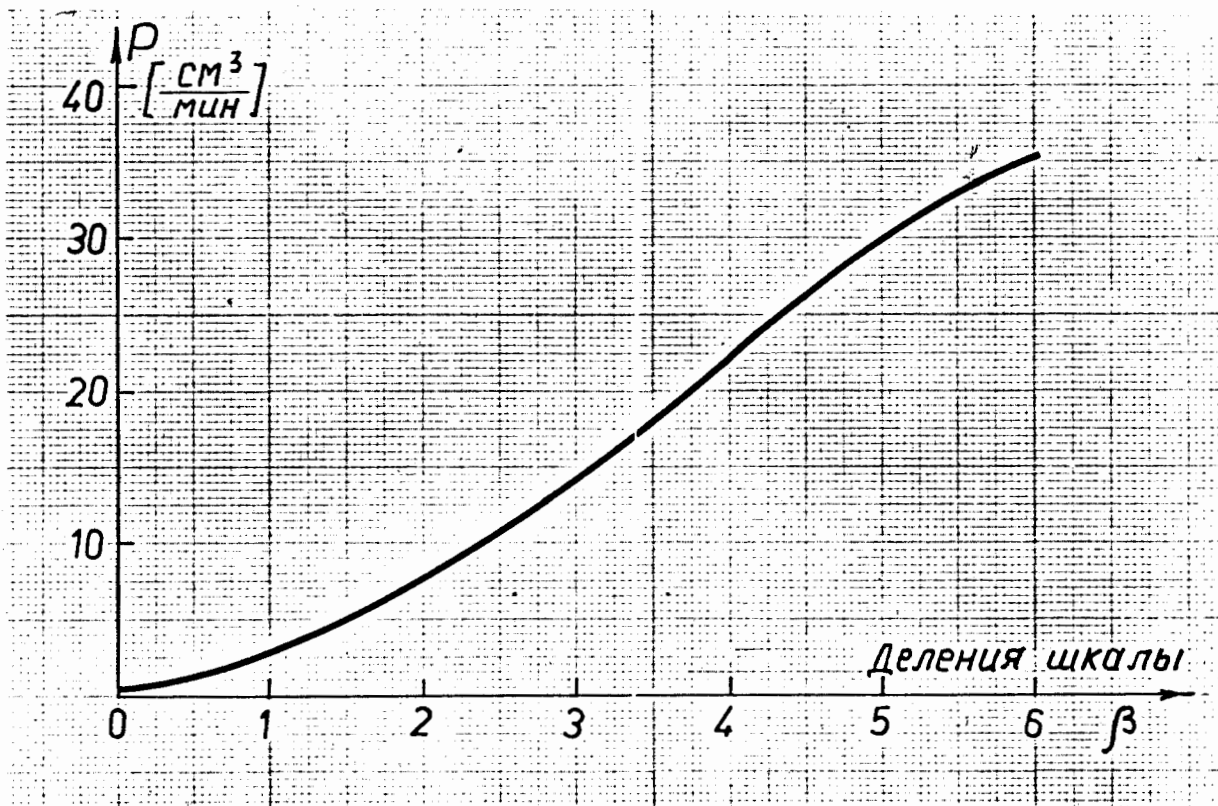


Рис. 10. Зависимость скорости подачи водорода в источник (расход газа) P от делений шкалы крана натекателя β .

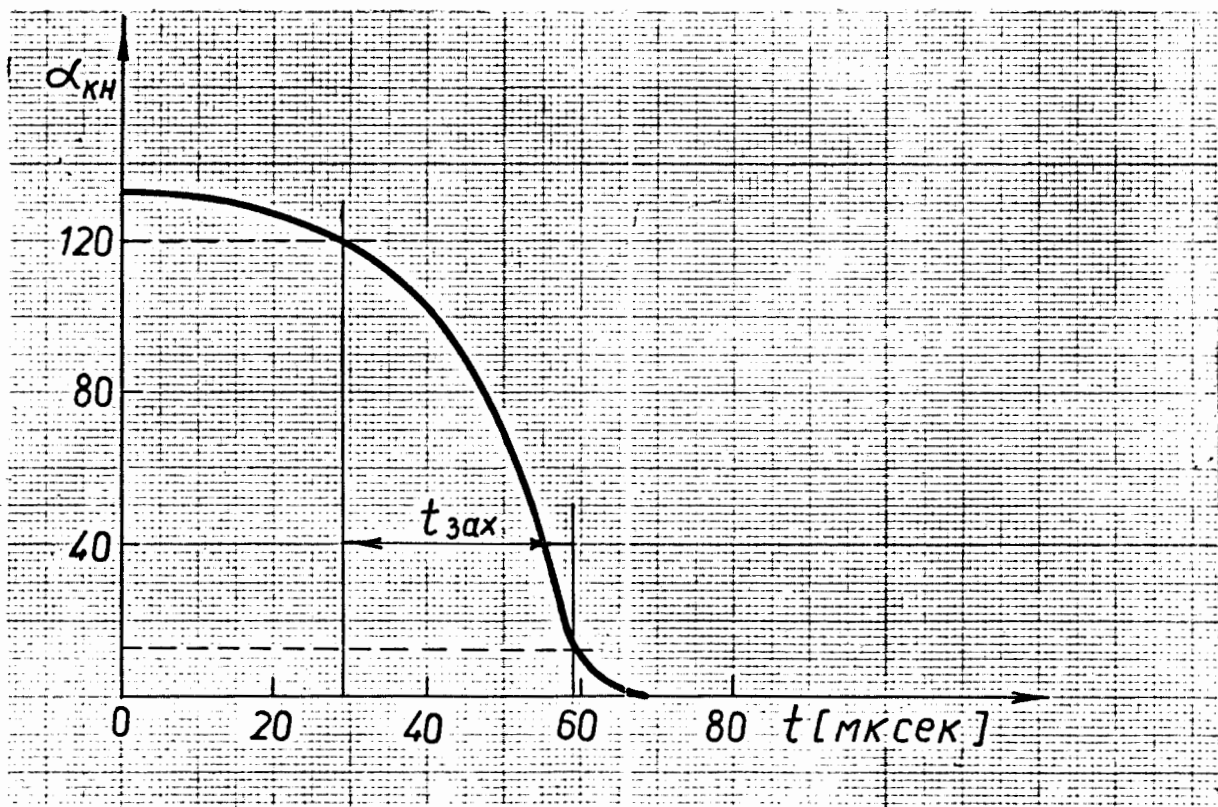


Рис. 11. Зависимость интенсивности от времени задержки включения в.ч. генератора (старый вариатор) $I_{\text{осн}} = 4300 \text{ А}$, $I_{\text{под}} = 230 \text{ А}$, $U_{\text{до}} = 22,5 \text{ кВ}$, $E_{\text{а}} = 7,2 \text{ кВ}$, $F_{\text{М}} = 113 \text{ Гц}$, $U_{\text{Ф}} = -8 \text{ кВ}$.

На рис. II показана типичная зависимость интенсивности α_{KH} , регистрируемой камерой "KH"*) от времени задержки включения в.ч. генератора.

За начало отсчета времени принималось время задержки, соответствующее максимальному значению интенсивности. Изменение временной задержки производилось дискретно через 10 мксек с точностью $\pm 0,1\%$. Временем захвата считался интервал времени, соответствующий изменению интенсивности от 0,9 до 0,1 максимальной. Многократные измерения при частоте модуляции $F_M = 113$ Гц дали значения $t_{зах} = 30+35$ мксек. При таком времени $t_{зах}$ эффективность захвата получается равной $\epsilon = t_{зах} F_M \approx 0,0037 \pm \pm 0,0004$.

В процессе длительной по времени эксплуатации ускорителя его работа определялась параметрами, приведенными в таблице I.

Таблица I

Режимы	Параметры		$I_{осн}$ [А]	$I_{под}$ [А]	E_a [кВ]	F_M [Гц]	$U_{ф}$ [кВ]
	Интенс.						
Внутр. пучок $R_H = 274,5$ см	$\alpha_H = 86$	$\alpha_{KH} = 130$	4420	230	7,2	113	-7
	$i = 2,4$ мкА						
Вывод $R_{воз.} = 280,3$ см $R_{рег.} = 292,3$ см	$\alpha_{п} = 0,73$		4300	265	7,2	113	-6

*) Так как камера "KH" расположена в коллиматоре, ее показания линейно связаны с интенсивностью внутреннего пучка, в отличие от камеры "H", регистрирующей общий фон излучения от ускорителя.

На синхроциклотроне ОИЯИ до 18 сентября 1973 года использовался вариатор, схематический чертеж которого приведен на рис.12, а фотография ротора вариатора со стороны коллекторного конденсатора - на рис.13.

В 1973 году было принято решение промоделировать на синхроциклотроне ОИЯИ вариатор установки "Ф"^{12/}, главными отличительными особенностями которого являются увеличенный рабочий ход и материал роторных дисков (алюминиевый сплав). В ходе моделирования предполагалось решить вопрос о применимости алюминиевого сплава для изготовления ротора и одновременно продемонстрировать увеличение интенсивности ускоренных частиц за счет увеличенного рабочего хода. Поэтому угловая протяженность роторных лопаток и статорных пластин нового вариатора были выбраны такими же, как и у вариатора установки "Ф", а профиль статорных лопаток подобран так, чтобы получить частотную программу, близкую к частотной программе старого вариатора (рис.14, кривая 1). При этом, однако, частотная программа нового вариатора была слегка скорректирована (рис.14, кривая 3) с тем, чтобы устранить имевшие место фазовые потери.

3. Настройка высокочастотной системы с вариатором новой конструкции.

В сентябре 1973 г. на синхроциклотроне был установлен сконструированный и изготовленный в Лаборатории ядерных проблем вариатор, схематический чертеж и фотография которого даны на рис.15 и 16/3/.

Ротор нового вариатора состоит из девяти дисков. Каждый диск имеет десять симметрично расположенных лопаток угловой

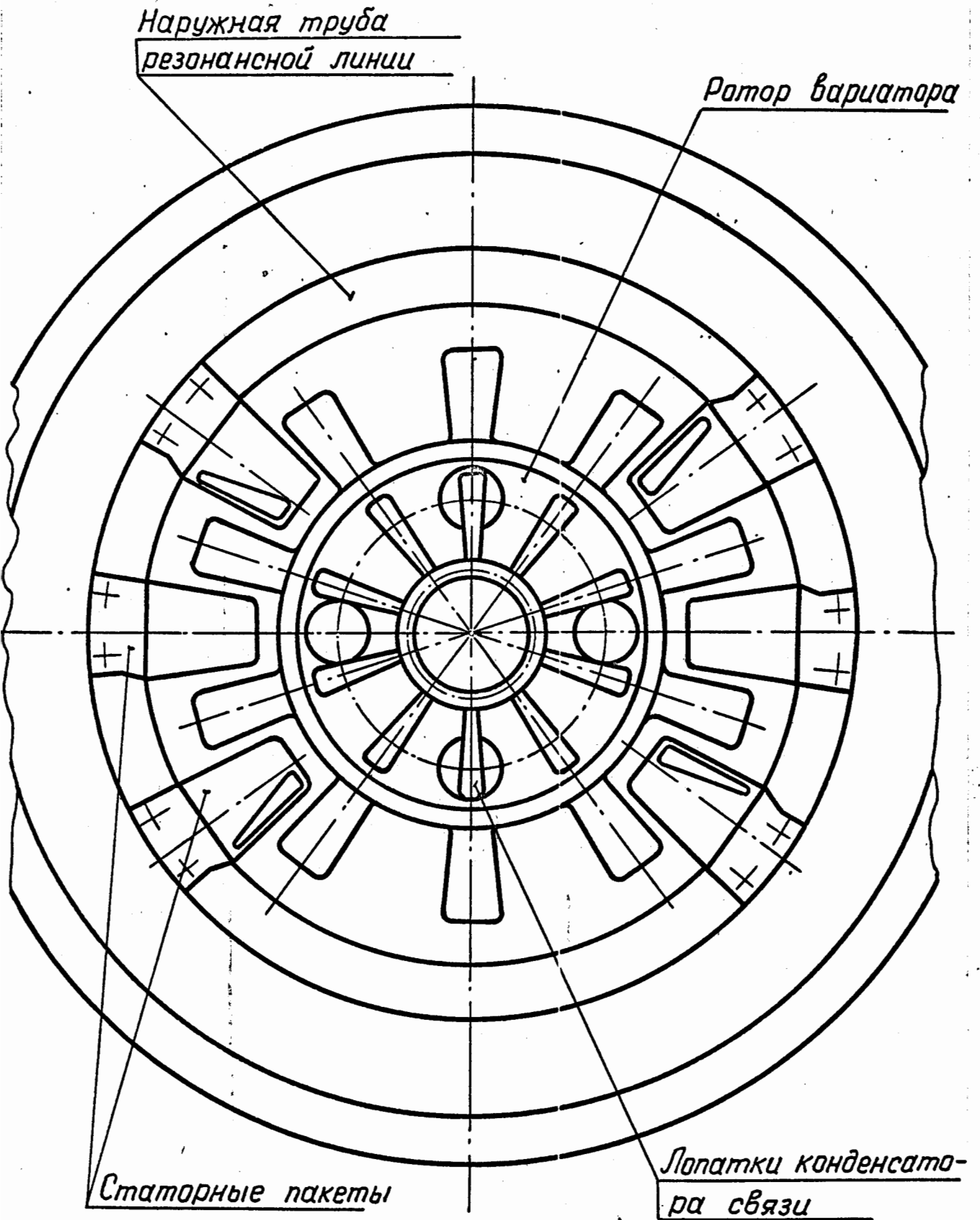


Рис. 12. Схематический чертеж вариатора старой конструкции.

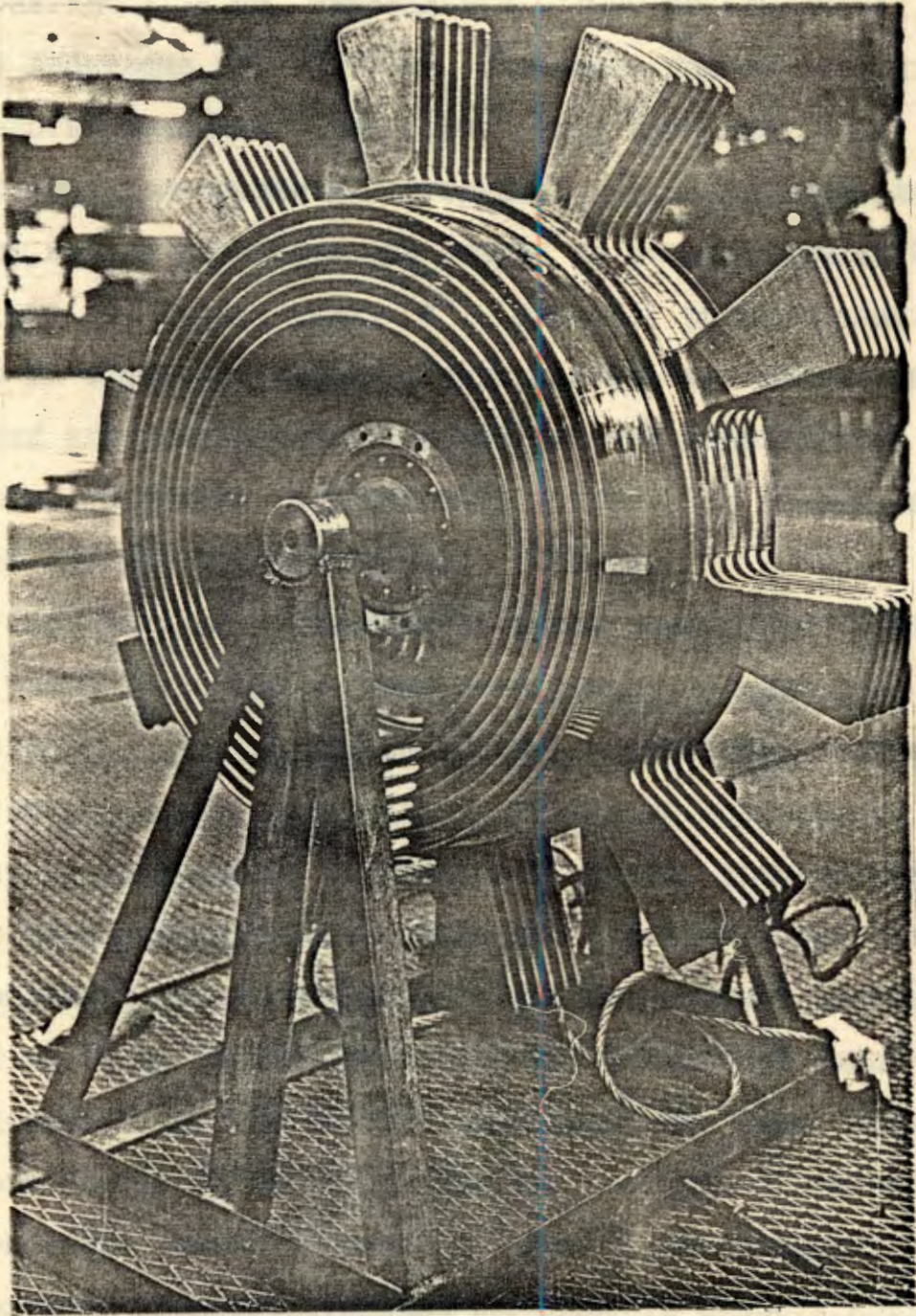


Рис. 13. Ротор вариатора старой конструкции .

протяженностью 7° и толщиной 8 мм. Максимальный диаметр ротора по лопаткам 1134 мм, минимальный — 1080 мм (см.рис.17). Зазор между лопатками ротора 13 мм. Статорные пакеты состоят из десяти пластин толщиной 6 мм, зазор между которыми 15 мм. При этом зазор между роторными и статорными пластинами составляет 3,5 мм. Статор нового вариатора был набран из восьми широких (29°) пакетов (рис.18) и двух узких (4°) (рис.19), расположенных симметрично на статорном кольце. Узкие пакеты были поставлены вместо широких для уменьшения начальной емкости вариатора на верхних частотах диапазона. В результате минимальная емкость получилась равной 300 пФ, а максимальная — 3700 пФ.

Одновременно с разработкой новой конструкции вариатора частоты разрабатывалась и новая конструкция конденсатора связи. Конденсатор связи должен обеспечить необходимую величину связи во всем диапазоне частот для получения по возможности постоянной амплитуды ускоряющего напряжения в течение времени ускорения. Для этого было необходимо по сравнению со старым конденсатором связи увеличить связь генератора с высокочастотной системой на частотах от 17 до 14 МГц без повышения минимальной емкости системы, определяющей верхнюю частоту диапазона. Это было достигнуто увеличением на 40 мм внешнего диаметра роторных и статорных пластин конденсатора связи. В основу расчета формы статорных пластин была положена экспериментальная зависимость емкости конденсатора связи от частоты для постоянной амплитуды ускоряющего напряжения.

Окончательная форма статорных пластин конденсатора связи изображена на рис.20. Для уменьшения начальной емкости конденсатора связи с его статора были сняты две (из десяти) симметрично

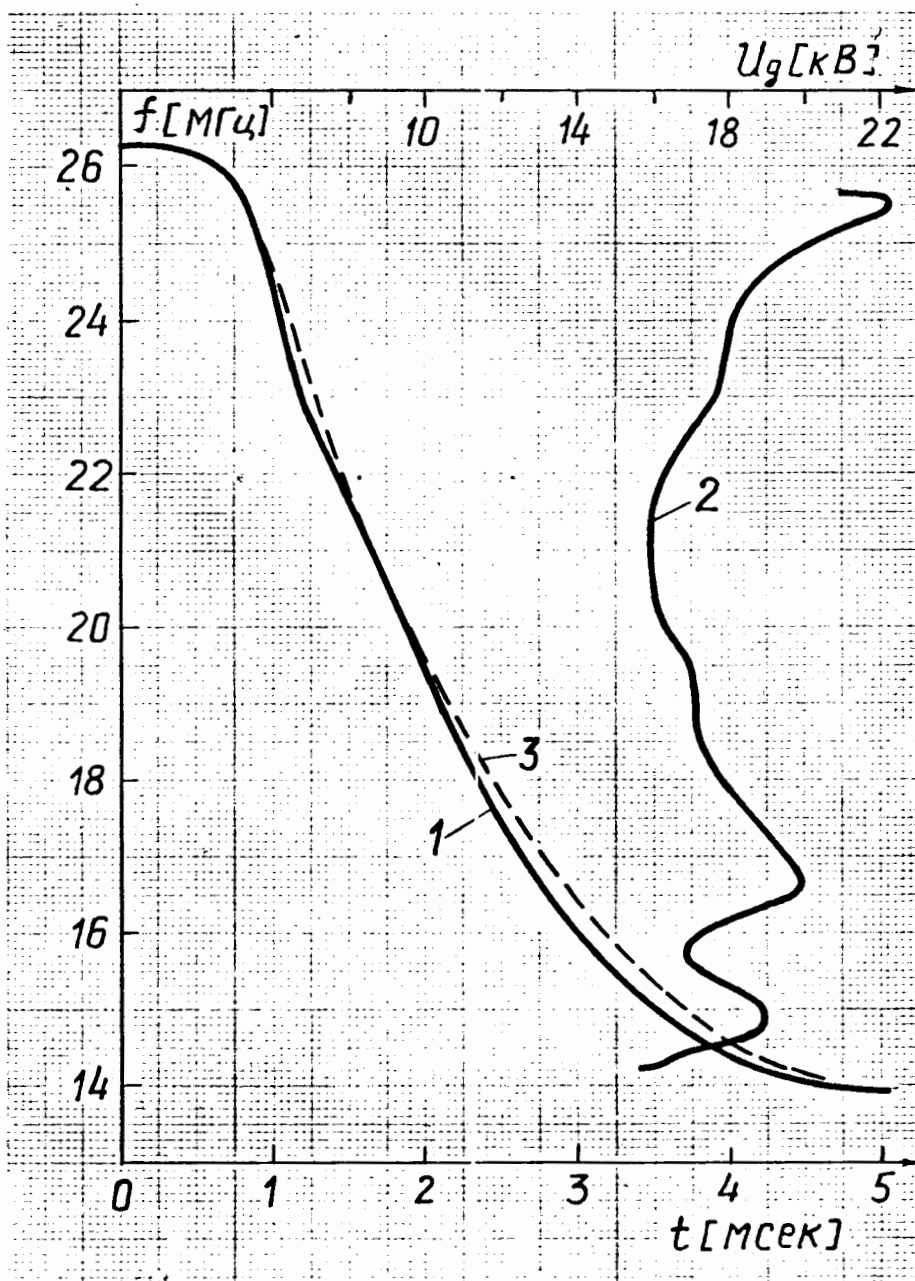


Рис. 14. Амплитудная и частотные характеристики синхроциклотрона при $E_a = 7,2$ кВ ($U_{g0} = 3,12 E_a$) и $F_M = 113$ Гц; 1 и 2 $f(t)$ и $U_g(f)$ от 11 сентября 1973 г. 3 - $f(t)$ - расчетная без фазовых потерь для кривой 2.

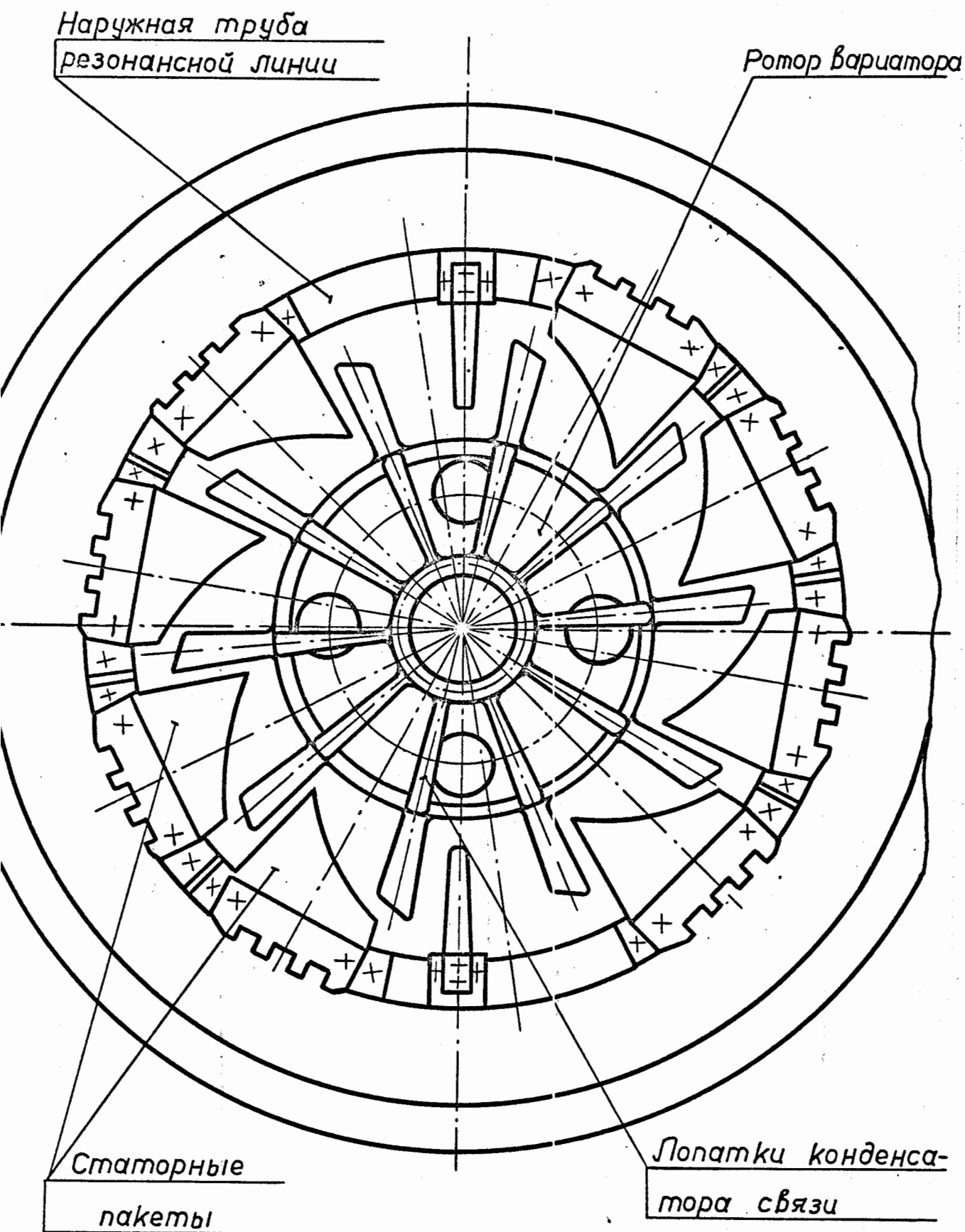


Рис. 15. Схематический чертеж вариатора новой конструкции.

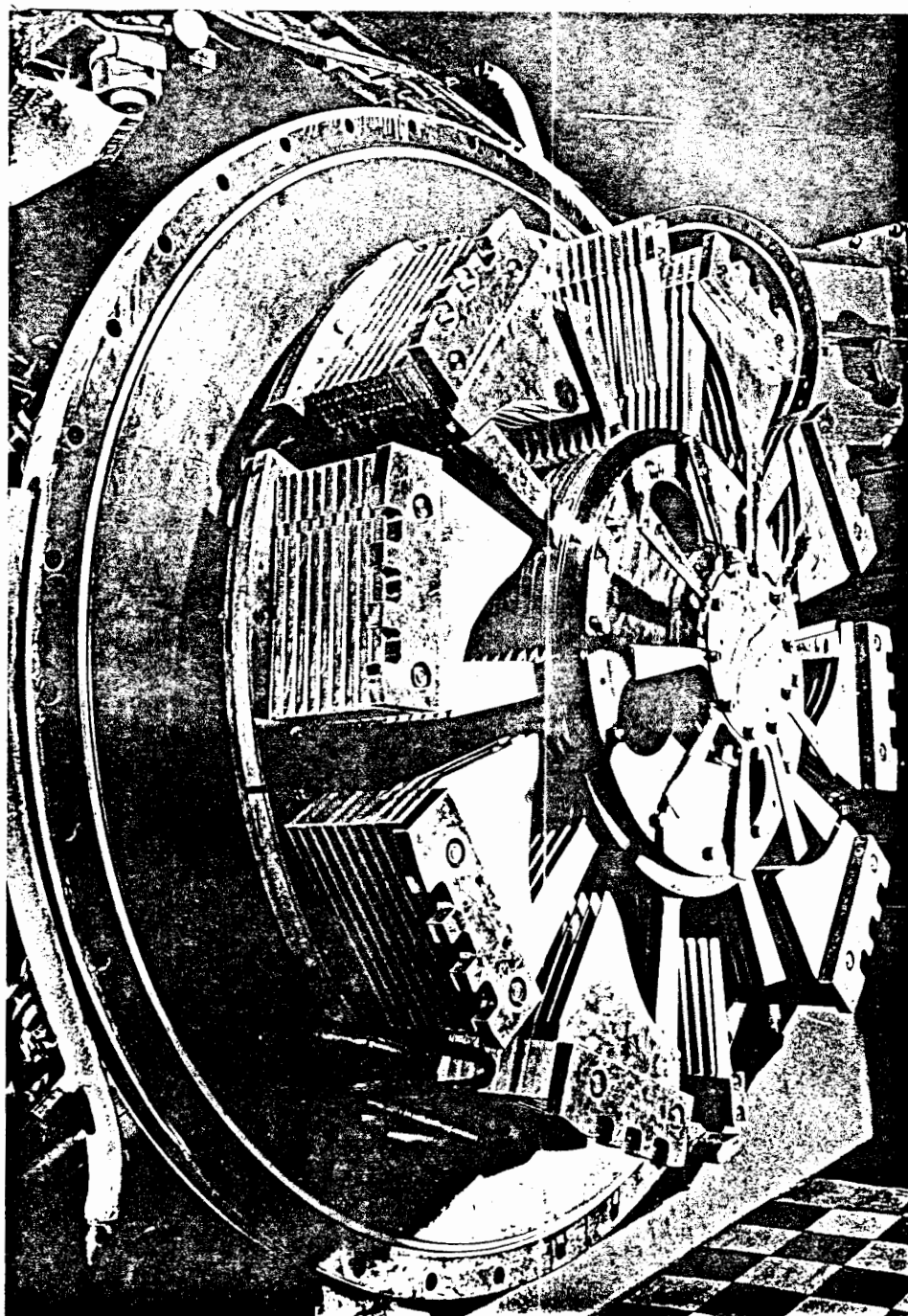


Рис. 16. Вариатор новой конструкции.

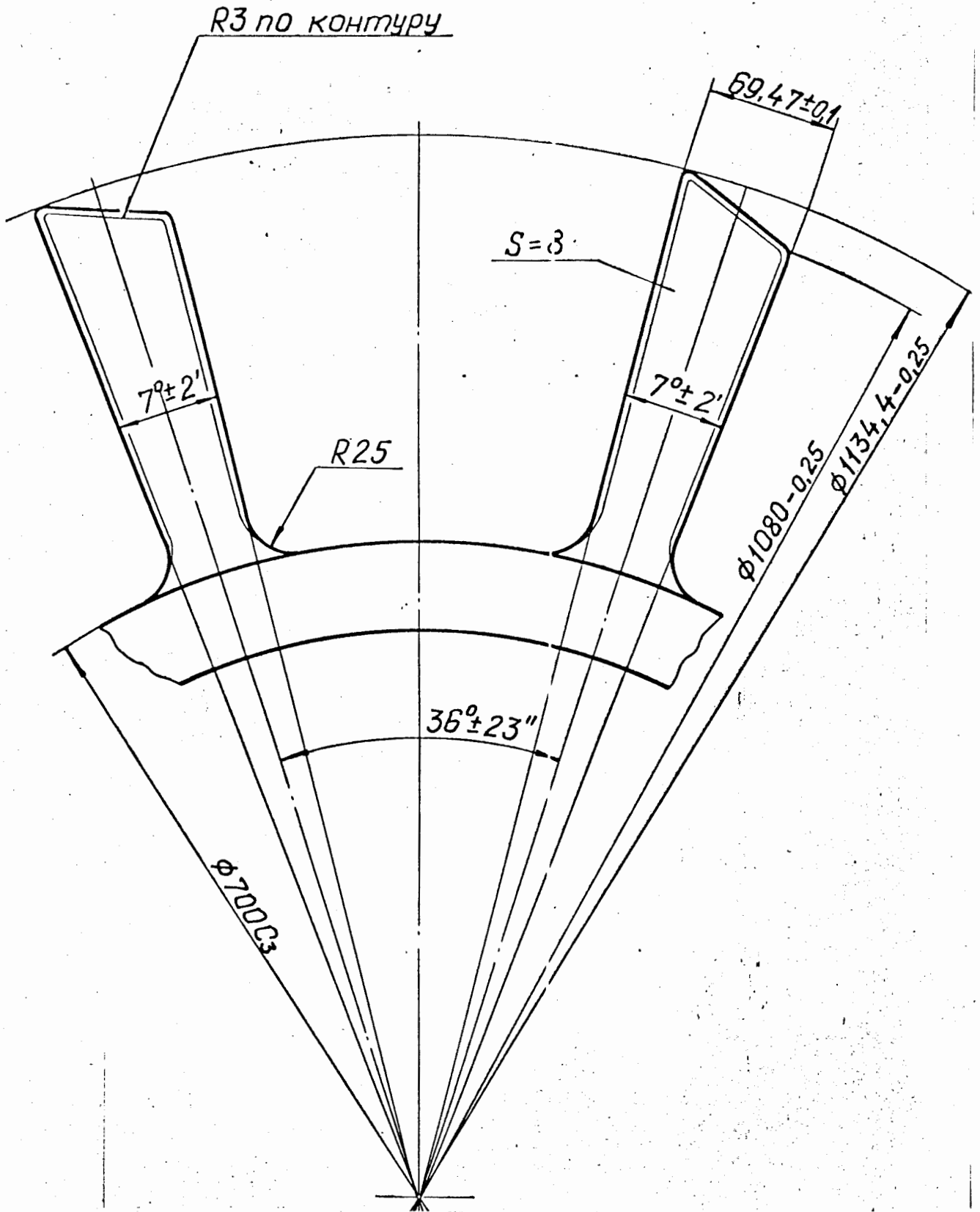


Рис. 17. Форма лопаток ротора нового вариатора. М 1:6.

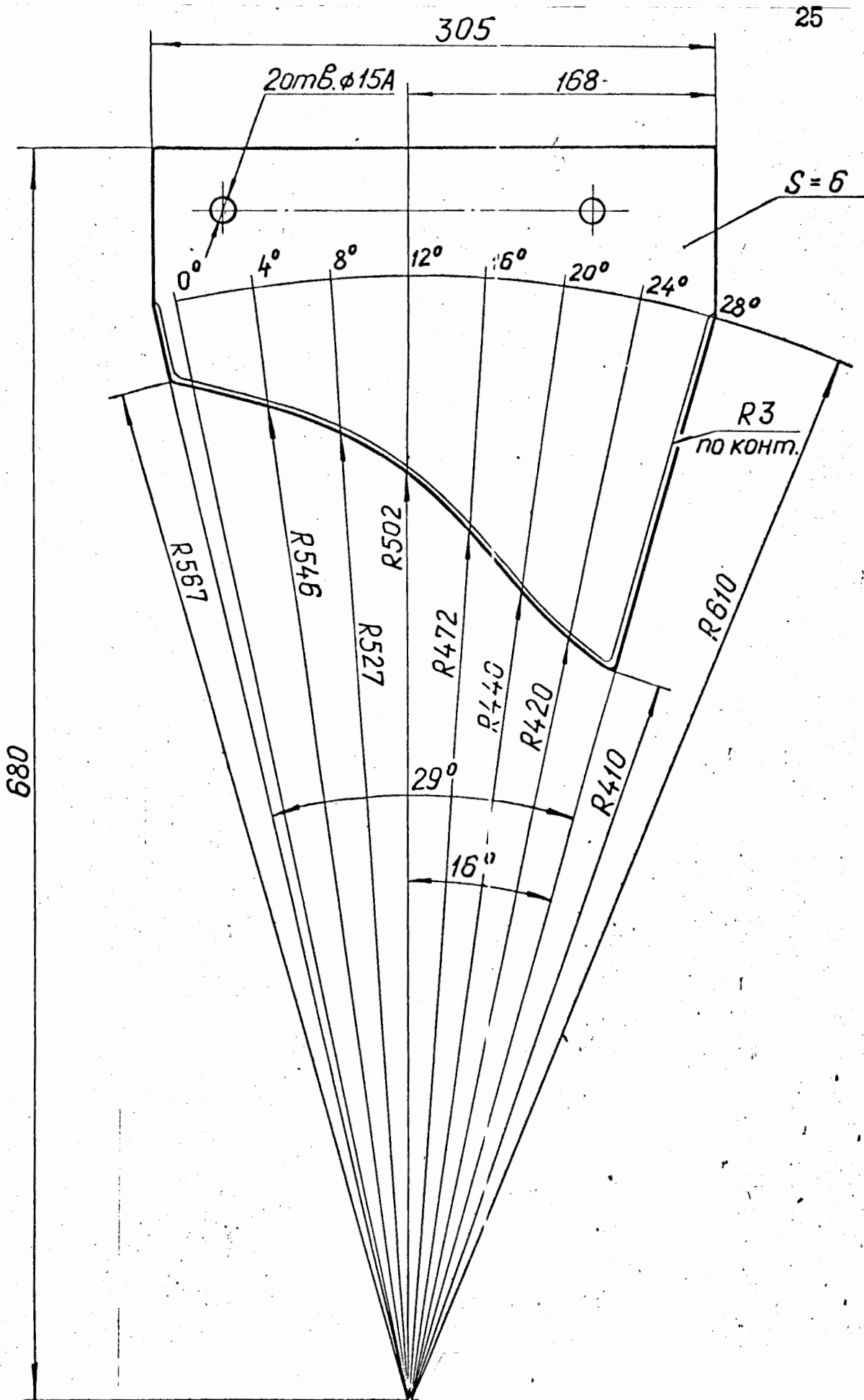


Рис. 18. Форма широких статорных пакетов нового вариатора. М 1:3.

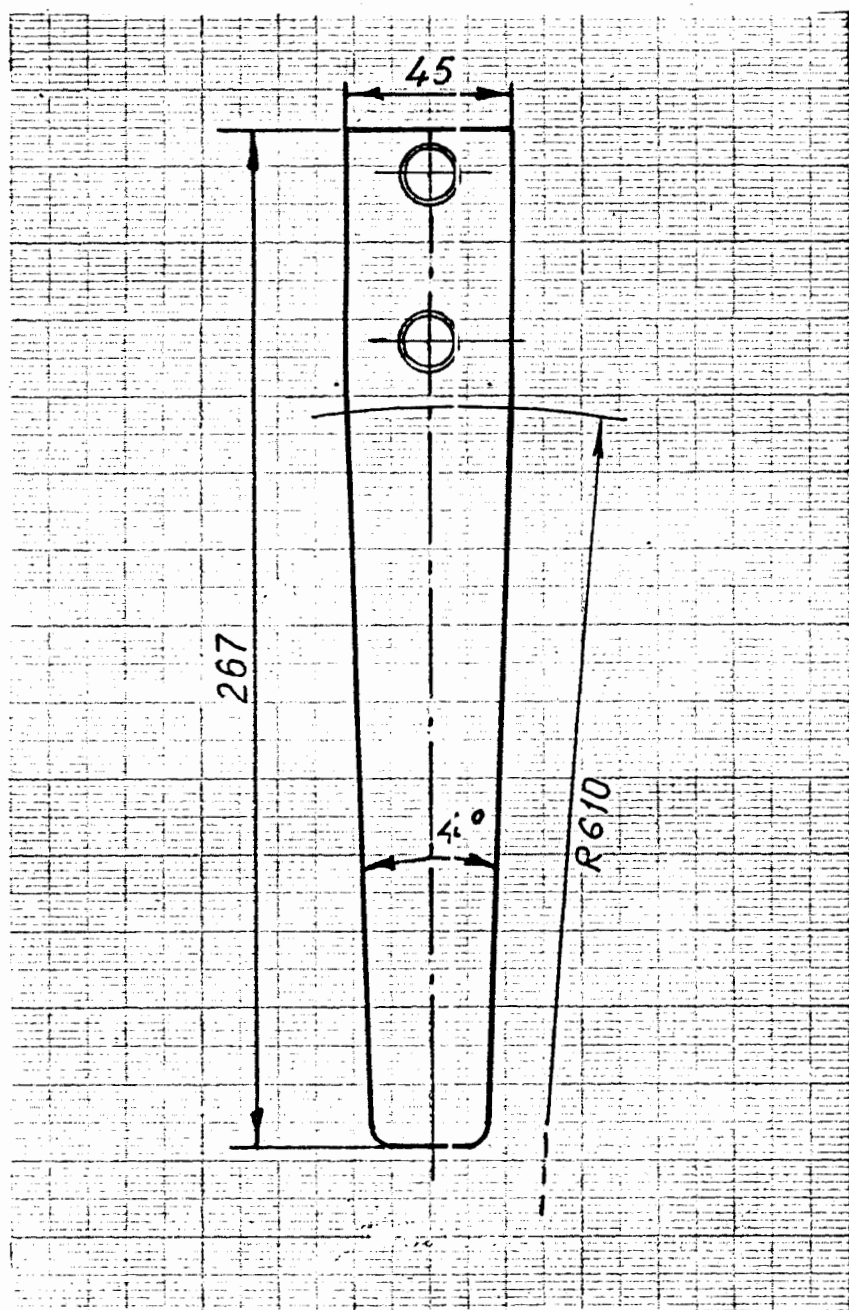


Рис. 19. Форма узких статорных пакетов нового вариатора. М 1:2.

расположенных лопатки. Число роторных лопаток конденсатора связи 10, их угловая протяженность 8° , а максимальный радиус 350 мм. При настройке резонансной системы с целью оптимизации амплитудно-частотной характеристики имеется возможность дистанционно в рабочих условиях менять зазор между статорными и роторными лопатками конденсатора связи от 3 до 10 мм и их взаимное расположение по азимуту. Роторные и статорные пластины вариатора частоты, роторные цилиндры коллекторного конденсатора, а также пластины конденсатора связи сделаны из алюминиевого сплава Д16М без специального покрытия, чтобы проверить возможность изготовления вариатора установки "Ф" /12/ из этого же материала и надежность его работы при длительной эксплуатации.

На рис.21 показаны зависимости частоты от угла поворота для вариаторов старой и новой конструкций. Из приведенных графиков видно, что для вариатора новой конструкции соотношение

$$\frac{t_{yc}}{T_m} = 0,6, \text{ а отношение } \left(\frac{t_{yc}}{T_m}\right)_{нов.вар.} : \left(\frac{t_{yc}}{T_m}\right)_{ст.вар.} = 1,46.$$

Если изобразить на одном графике (рис.22) зависимости $f(t)$ со старым и новым вариаторами, то для совмещения частот захвата и вывода по оси времени частоту модуляции с новым вариатором надо увеличить в 1,46 раза. Увеличение числа циклов в секунду при том же ускоряющем напряжении на захвате должно привести к пропорциональному повышению среднего тока ускоренных протонов, если при этом не возрастут фазовые потери.

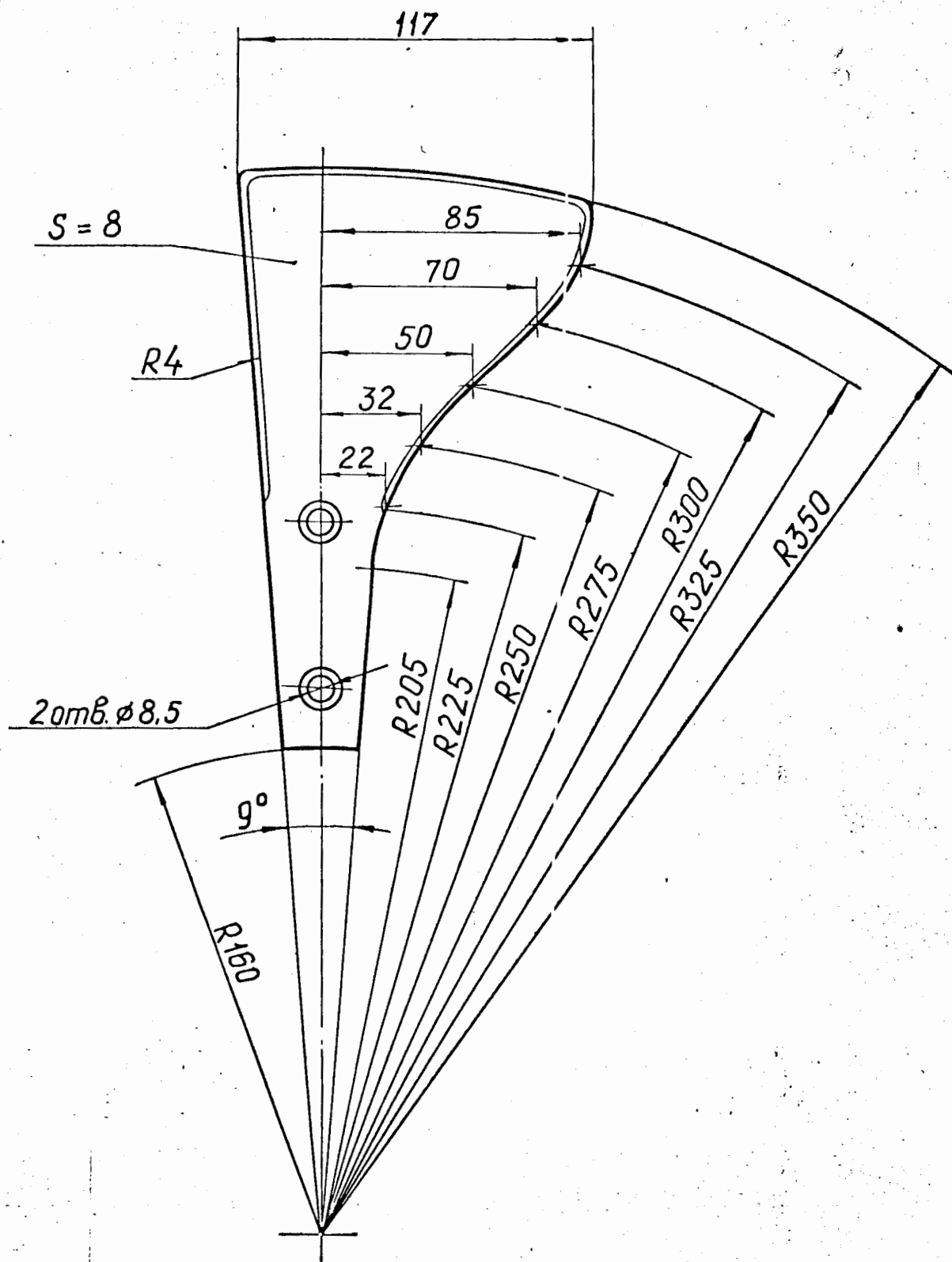


Рис. 20. Форма статорных пластин конденсатора связи. М 1:2.

4. Характеристики синхротрона ОИЯИ с новым вариатором

Первоначально, при восьми широких статорных пакетах и двух узких была получена верхняя частота диапазона $f_B = 25,92$ МГц и нижняя частота $f_H = 14,01$ МГц.

На рис.23 показаны характеристики в.ч. системы ускорителя f_1, \dot{f}_1 и U_{g1} после установки вариатора новой конструкции для $F_M = 167$ Гц и $E_a = 7,2$ кВ. Сравнение амплитудных характеристик для вариаторов старой и новой конструкций (см.рис.1 и рис.23, U_{g1}) показывает, что с вариатором новой конструкции амплитуды ускоряющего напряжения в диапазоне частот от 24 МГц до 17 МГц несколько увеличились (до 2 кВ). При этом кривая $\dot{f}(f)$ имеет более регулярный характер, а максимум производной \dot{f} соответствует примерно той же частоте, что и для старого вариатора.

Сравнение кривых (рис.4 и рис.24), характеризующих наличие фазовых потерь в процессе ускорения, показывает явные преимущества вариатора новой конструкции. Для нового вариатора фазовые потери практически отсутствуют, тогда как для вариатора старой конструкции в диапазоне от 40 до 90 см имели место значительные фазовые потери.

На рис.25 приведена зависимость интенсивности по камере "Н" от радиуса установки пробника с бериллиевой мишенью сразу после запуска ускорителя с новым вариатором. Максимальная интенсивность

$\alpha_H = 108$ получилась на $R_M = 274$ см при $E_a = 7,2$ кВ, $U_{\phi} = -8$ кВ и $F_M = 140$ Гц. На том же рисунке для сравнения приведена кривая α_H со старым вариатором для $F_M = 113$ Гц. Видно существенное увеличение интенсивности с новым вариатором. Показания

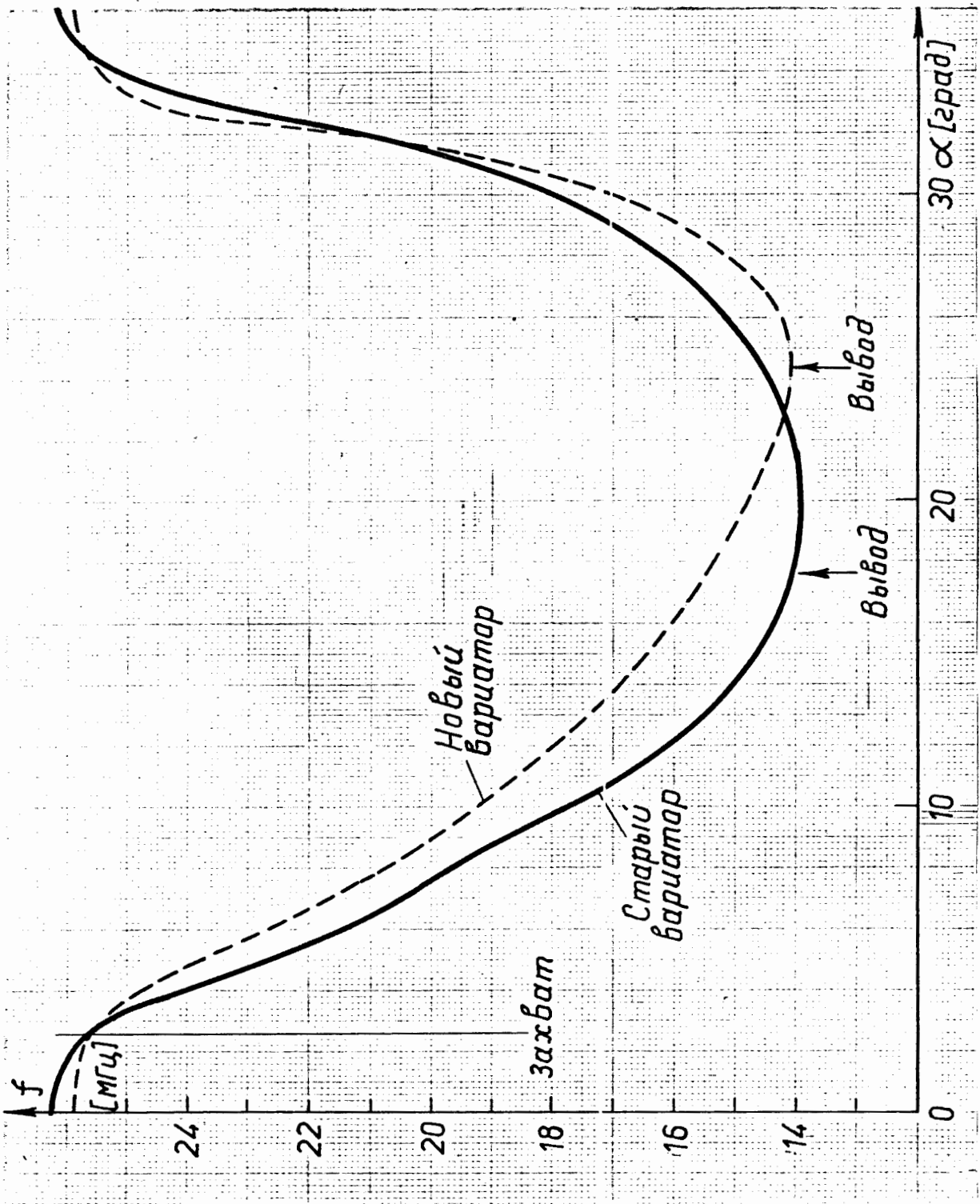


Рис. 21. Зависимости $f = f(\alpha)$ для старого и нового вариаторов: $\left(\frac{t_{yc}}{T_M}\right)_{стар} = 0,41$, $\left(\frac{t_{yc}}{T_M}\right)_{нов} = 0,6$.

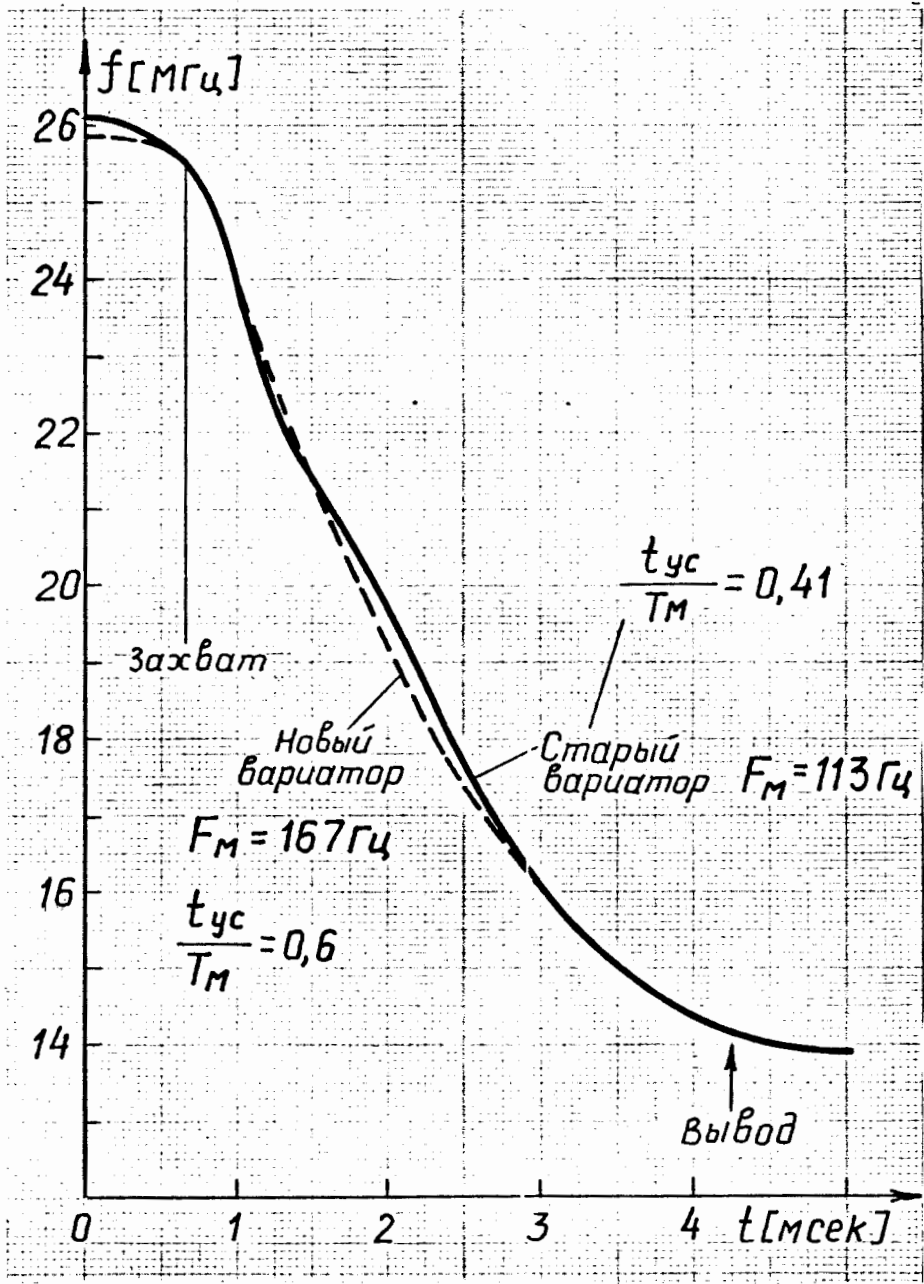


Рис. 22. Зависимости $f = f(t)$ для старого и нового вариаторов.

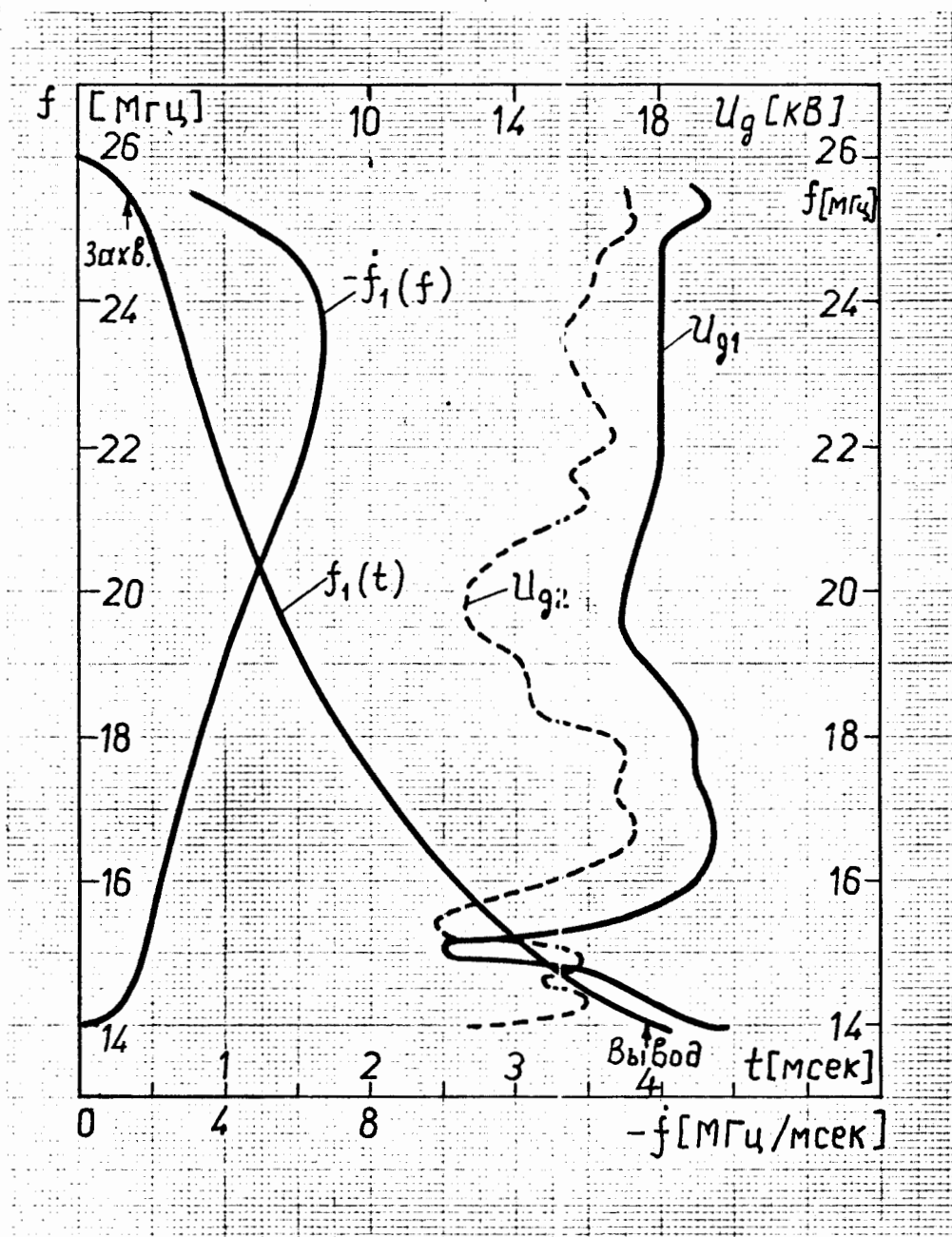


Рис. 23. Характеристики в.ч. системы синхроциклотрона с новым вариатором: f_1 , f_1 , U_{g1} - при запуске (15.11.73) для $E_a=7,2$ кВ и U_{g2} - после года работы (18.12.74) для $E_a=7,0$ кВ $F_M = 167$ Гц; $\frac{t_{ус}}{T_M} = 0,6$; на захвате $U_{g01} = 2,64 E_a$ и $U_{g02} = 2,43 E_a$

камеры "Н" нелинейно связаны с величиной тока пучка в отличие от показаний камеры "КН", которые пропорциональны току пучка. Значения $\alpha_H = 85$ и $\alpha_H = 108$ соответствуют $\alpha_{KH} = 150$ и $\alpha_{KH} = 230$. В таблице II приведены величина интенсивности и значения параметров после тщательной настройки в.ч. системы и генератора. Настройка производилась при помощи изменения волнового сопротивления в промежуточной камере, положительной и отрицательной обратной связи генератора, сопротивления в сеточной цепи генератора и связи генератора с системой.

Таблица II

Режим	Интенсивн. Параметры	$I_{осн.}$ [А]	$I_{под}$ [А]	E_a [кВ]	F_M [Гц]	U_ϕ [кВ]
Внутрен. пучок $R_M = 274,5 \text{ см}$	$\alpha_H = 115$ $\alpha_{KH} = 286$ $I = 5,3 \text{ мкА}$	4500	245	7,2	190	-8

Зависимости интенсивности внутреннего пучка от различных параметров ускорителя, по техническим причинам измеренные без подачи фокусирующего напряжения ($U_\phi = 0$), показаны на рисунках 26 и 27. А как установлено ранее ^{12/} (см. также рис. 5 и 7), в рабочем режиме подача фокусирующего напряжения увеличивает интенсивность примерно вдвое.

Из рис. 26 и 27 видно, что вследствие существенного улучшения фазового режима (см. рис. 4 и 24) рост интенсивности при рабочем значении ускоряющего напряжения на захвате $U_{g_0} = 19 \text{ кВ}$ ($E_a = 7,2 \text{ кВ}$) не прекращается вплоть до частоты модуляции $F_M = 240 \text{ Гц}$, а увеличение E_a до $8,6 \text{ кВ}$ ($U_{g_0} = 22,7 \text{ кВ}$) при $F_M = 220 \text{ Гц}$ приводит к

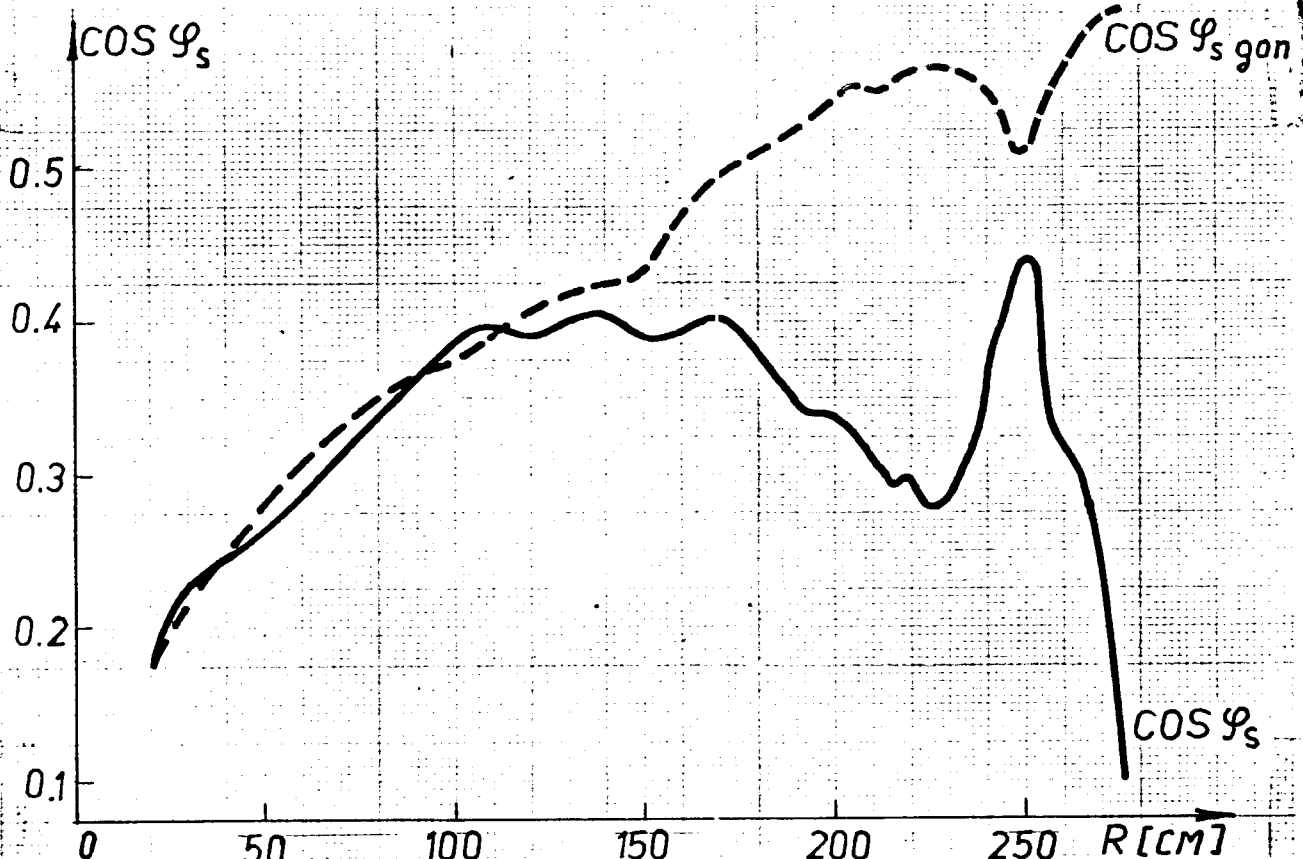


Рис. 24. Зависимости $\cos \varphi_s$ и $\cos \varphi_{s \text{ gon}}$ от радиуса для нового вариатора при запуске (15.II.73) при $f_0 = 25,52 \text{ МГц}$, $E_a = 7,2 \text{ кВ}$, $U_{go} = 19 \text{ кВ}$, $F_M = 167 \text{ Гц}$, $\dot{f}_0 = -3,2 \frac{\text{МГц}}{\text{мсек}}$.

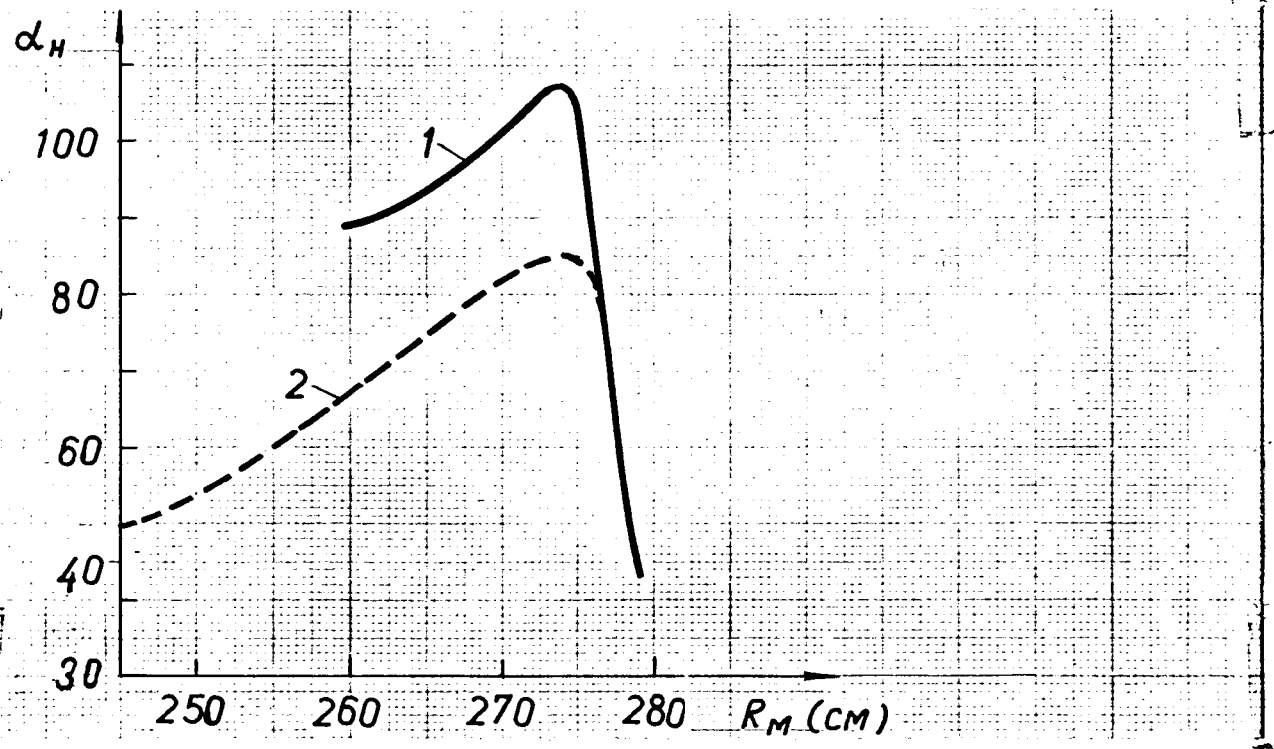


Рис. 25. Зависимости интенсивности от радиуса установки пробника с бериллиевой мишенью: 1 - после запуска нового вариатора (10.II.73) при $I_{осн} = 4290 \text{ А}$, $I_{под} = 235 \text{ А}$, $E_a = 7,2 \text{ кВ}$, $U_{go} = 19 \text{ кВ}$, $F_M = 140 \text{ Гц}$, $\dot{f}_0 = -2,68 \text{ МГц/мсек}$ и $U_{\phi} = -8 \text{ кВ}$, 2 - для старого вариатора (11.9.73) при $I_{осн} = 4420 \text{ А}$, $I_{под} = 235 \text{ А}$, $E_a = 7,2 \text{ кВ}$, $U_{go} = 22,5 \text{ кВ}$, $F_M = 113 \text{ Гц}$, $\dot{f}_0 = -3 \text{ МГц/мсек}$, $U_{\phi} = -7 \text{ кВ}$.

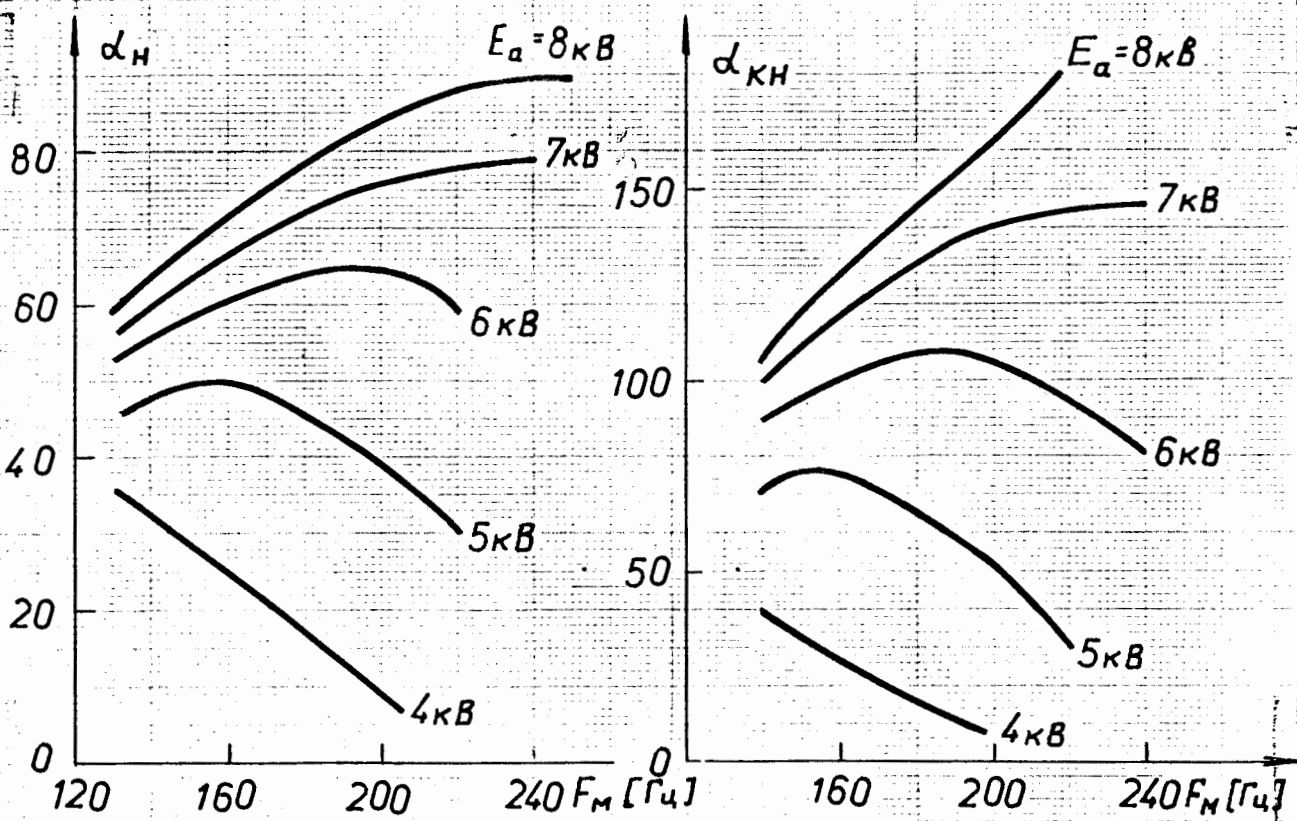


Рис. 26. Зависимости интенсивности от частоты модуляции F_M при разных значениях E_a -анодного напряжения генератора (28.II.73), $I_{осн}=4400A$, $I_{под}=240A$, $U_{\phi}=0$, ускоряющее напряжение на захвате $U_{g0}=2,64E_a$

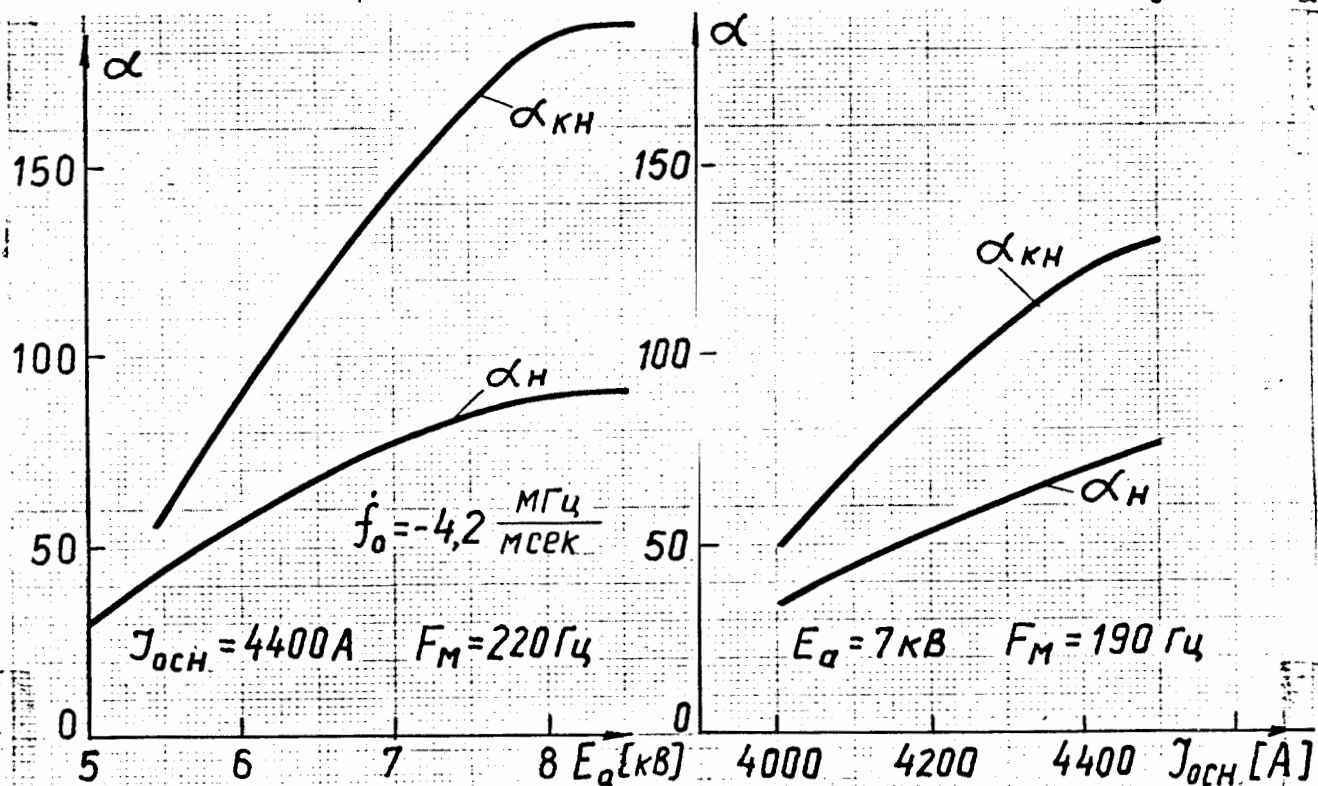


Рис. 27. Зависимости интенсивности от E_a и $I_{осн}$ после настройки в.ч. системы (28.II.73) при $I_{под}=240A$, $U_{\phi}=0$, $U_{g0}=2,64 E_a$.

дальнейшему росту интенсивности (в 1,5 раза) по сравнению с полученным режимом^ж).

Однако в процессе эксплуатации вариатора новой конструкции было выявлено, что система крепления дисков ротора и крепления коллекторного конденсатора на ступице ротора не обеспечивает необходимого контакта соприкасающихся поверхностей и приводит со временем к увеличению в.ч. потерь в рогоре вариатора и к ухудшению амплитудной характеристики синхроциклотрона. Так, снятые через год в.ч. характеристики синхроциклотрона (рис.23, кривая U_{g2} от 18.12.74) показывают уменьшение ускоряющего напряжения по частотному диапазону от двух до четырех киловольт, что, как видно из рис.28, привело к появлению существенных фазовых потерь в диапазоне радиусов от 45 до 170 см.

Зависимости интенсивности ускоренных частиц от основных параметров ускорителя представлены на рисунках 29,30 и 31. Из рисунка 31 видно, что вследствие ухудшения фазовых условий (рис.28) из-за уменьшения ускоряющего напряжения (рис.23, U_{g2}), интенсивность $\alpha_H = \alpha_H(F_M)$ при $E_\alpha = 7$ кВ начинает спадать уже при $F_M = 210$ Гц.

Величина интенсивности и значения параметров ускорителя в эксплуатационных режимах приведены в таблице III.

^ж Измерения интенсивности внутреннего пучка по активации алюминиевой фольги /1,2/, произведенные Полферовым Э.А. 20.01.76 при показаниях $\alpha_{KH} = 140$ дали значения среднего тока внутреннего пучка на конечном радиусе $i = 2,65 \pm 0,65$ мкА. Учитывая линейность показаний по камере "KH", можно предполагать, что после настройки ускорителя с новым вариатором 28.11.73 значение тока внутреннего пучка составляло $i \approx 5$ мкА при $E_\alpha = 7,2$ кВ и $F_M = 190$ Гц.

Таблица III

Режим	Параметры	$I_{осн.}$ [А]	$I_{под}$ [А]	E_{α} [кВ]	F_M [Гц]	U_{ϕ} [кВ]
	Интенсивн.					
Внутренний пучок $R_M = 274,5 \text{ см}$	$\alpha_H = 91$ $\alpha_{KH} = 135$ $i \approx 2,5 \text{ мкА}$	4500	240	7	183	-6
Вывод протонов	$\alpha_{п} = 0,55$	4300	260	7	183	-7

Из сравнения таблиц I, II, III видно, что установка нового вариатора дала ожидаемое увеличение интенсивности, однако в течение непрерывной эксплуатации выявившиеся конструктивные недостатки привели к понижению амплитуды ускоряющего напряжения, что в свою очередь вызвало увеличение фазовых потерь.

С целью устранения фазовых потерь для амплитудно-частотной характеристики при $E_{\alpha} = 7 \text{ кВ}$ (рис. 32, U_{q1}) была рассчитана частотная зависимость (кривая f_2), при которой не должно быть фазовых потерь. Для сравнения на рис. 32 приведены также зависимости $f(f)$: 1 - снятая 23.6.75 и 2 - расчетная для частоты модуляции $F_M = 167 \text{ Гц}$.

Близкую к расчетной зависимость $f(t)$ удалось получить, заменив два широких статорных пакета на пакеты со срезанными пластинами, форма которых показана на рис. 33. При таком наборе статорных пакетов (шесть широких, два срезанных и два узких) верхняя частота диапазона получилась равной 25,98 МГц, нижняя 13,98 МГц, а $\frac{t_{ус}}{T_M} = 0,57$. Высокочастотные характеристики с указанной выше комбинацией пакетов приведены на рис. 34, а об отсутствии фазовых потерь в процессе ускорения можно судить по графикам $\cos \varphi_s$ и

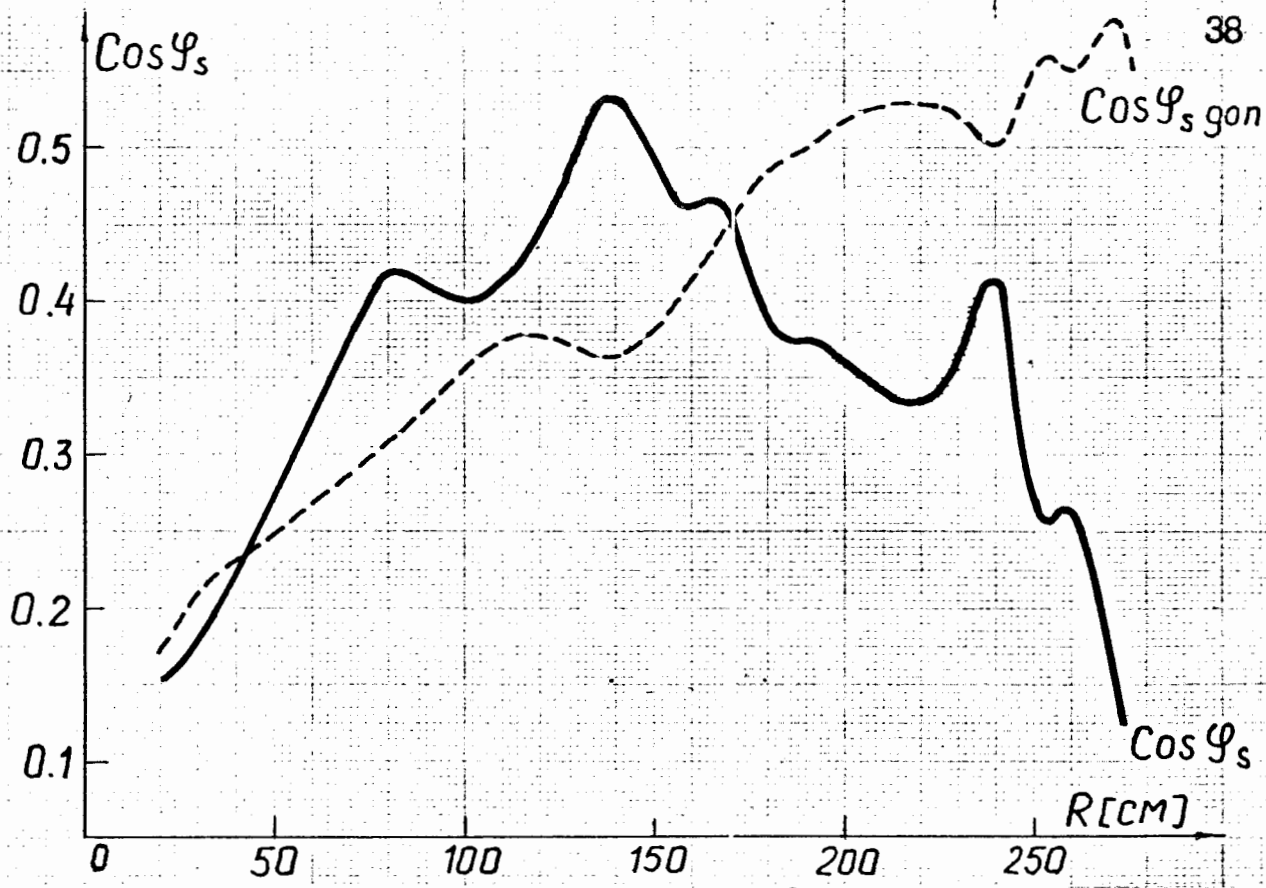


Рис. 28. Зависимости $\text{Cos } \varphi_s$ и $\text{Cos } \varphi_{s \text{ gon}}$ от радиуса после года работы нового вариатора (18.II.74) при $f_o = 25,52 \text{ МГц}$, $E_a = 7 \text{ кВ}$, $U_{go} = 17 \text{ кВ}$, $F_M = 167 \text{ Гц}$, $\dot{f}_o = -2,66 \frac{\text{МГц}}{\text{мсек}}$.

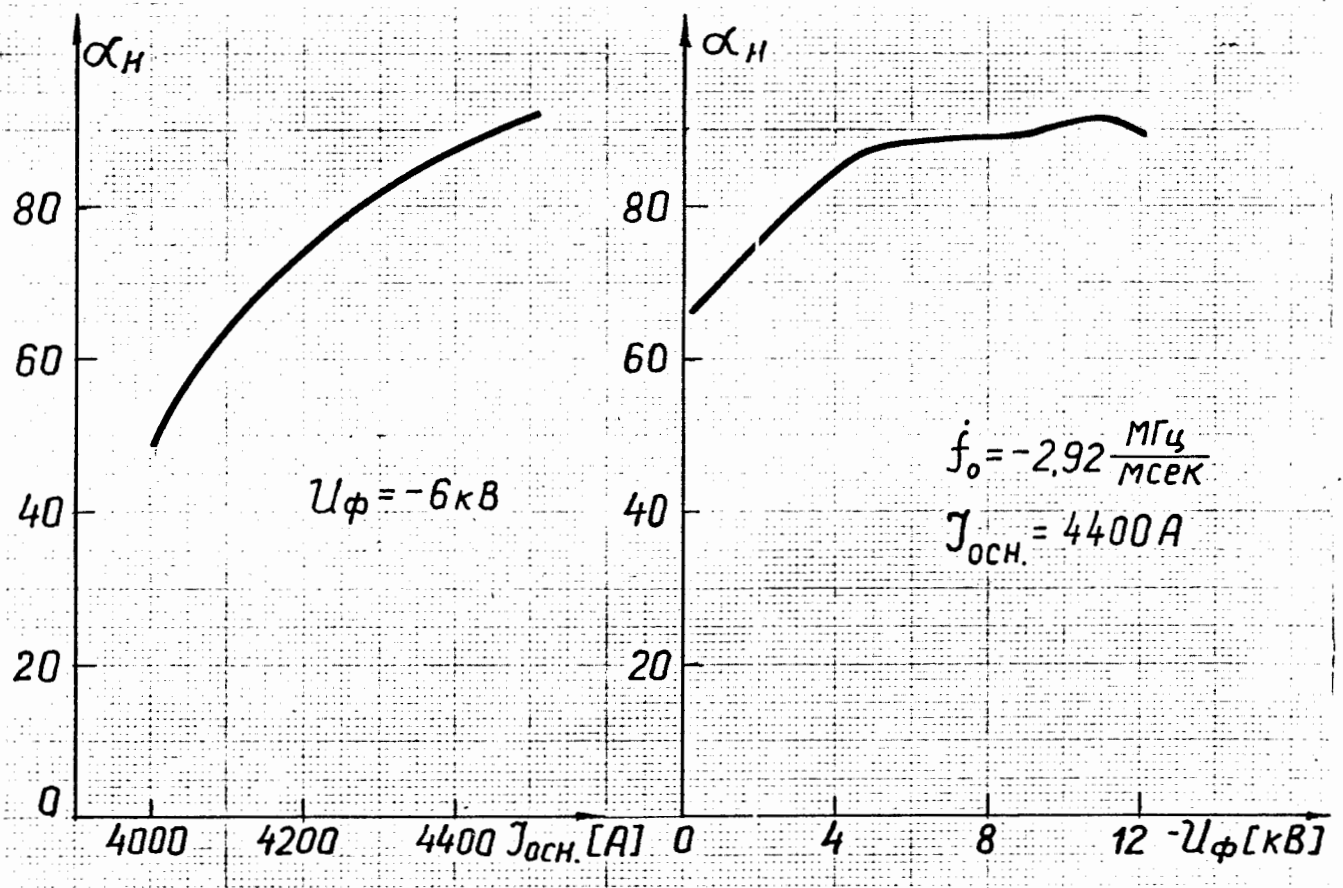


Рис. 29. Зависимости интенсивности от $J_{осн}$ и U_ϕ после года работы с новым вариатором (25.II.74) при $J_{под} = 240 \text{ А}$, $E_a = 7 \text{ кВ}$, $U_{go} = 17 \text{ кВ}$, $F_M = 183 \text{ Гц}$.

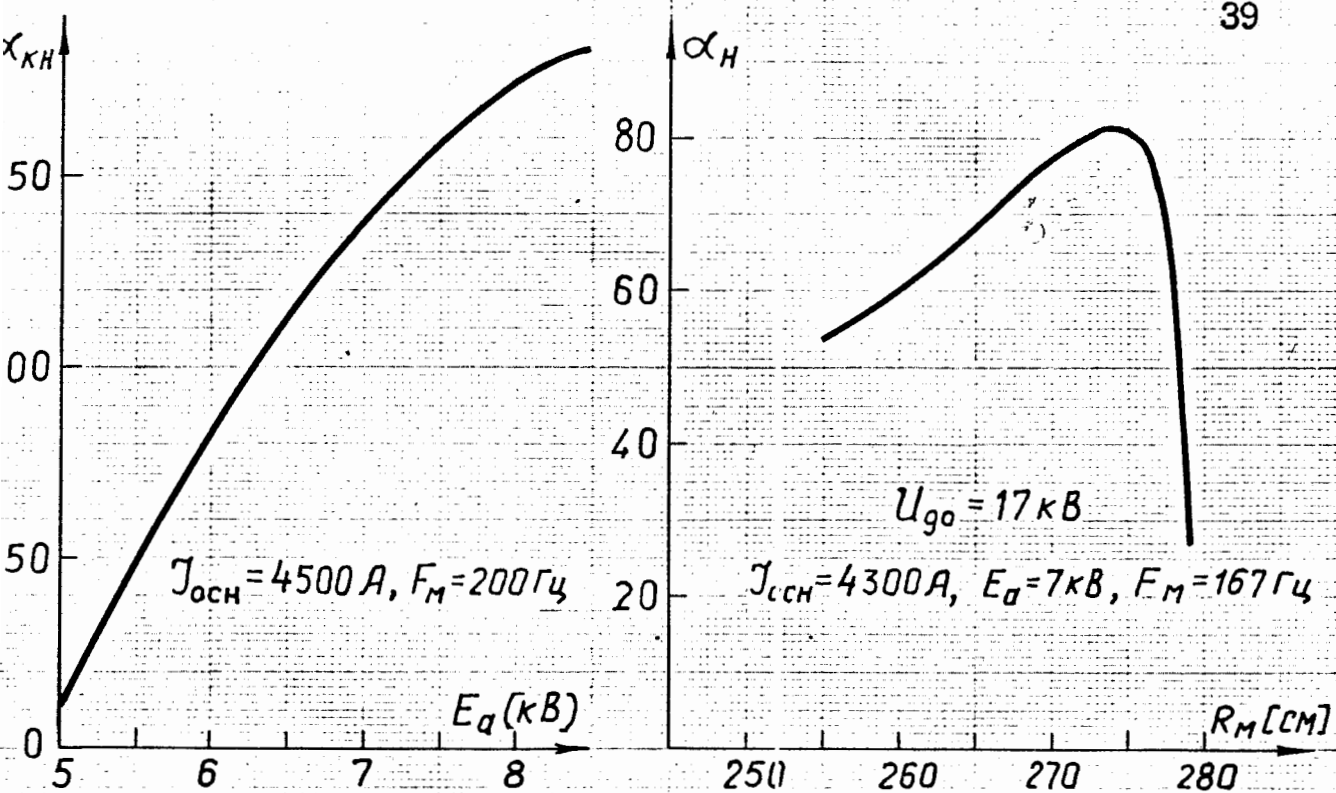


Рис. 30. Зависимости интенсивности от E_a и R_M после года работы с новым вариатором (25.II.74) при $J_{под} = 240 \text{ A}$, $U_{\phi} = -6 \text{ кВ}$, $U_{го} = 2,44 E_a$.

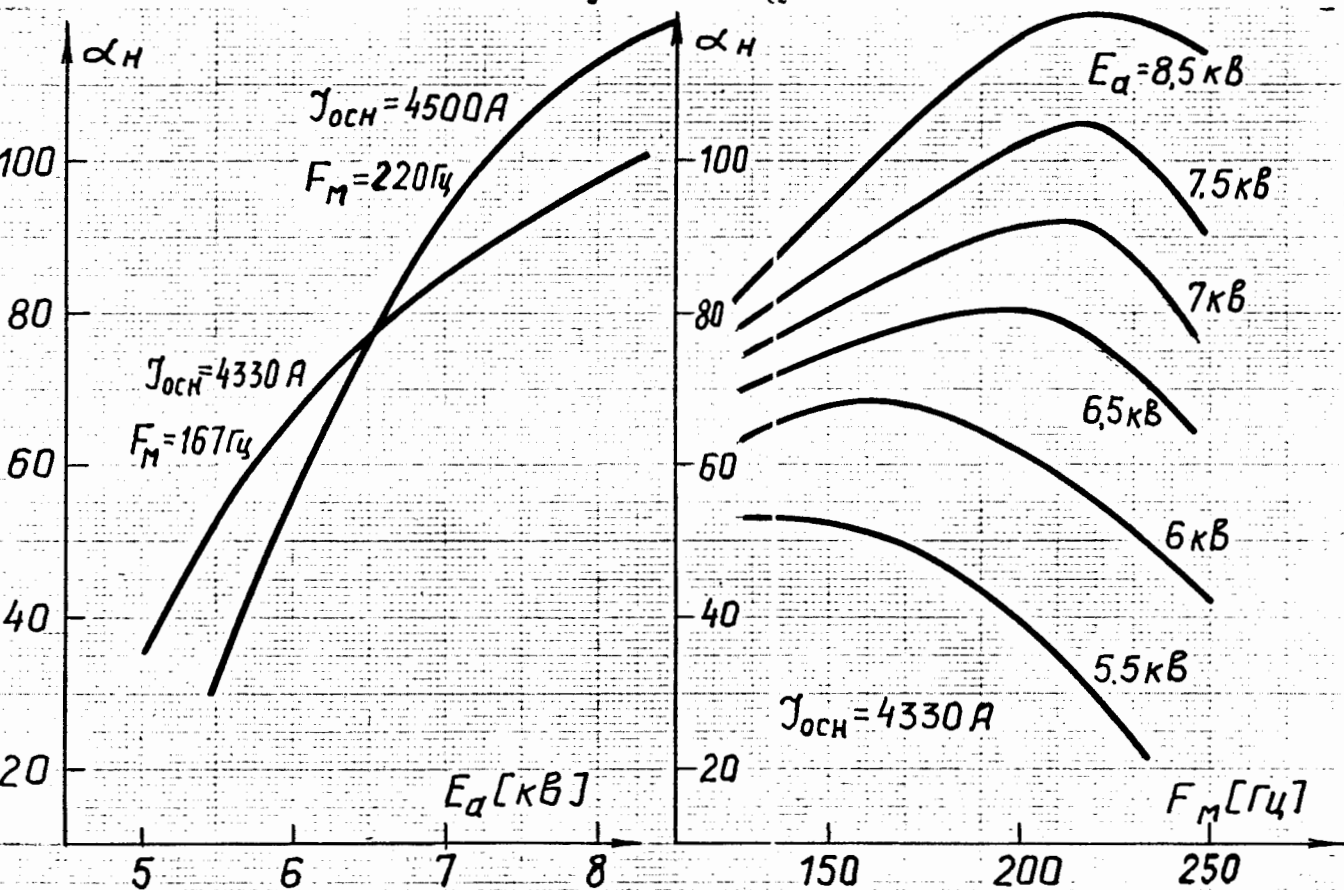


Рис. 31. Зависимости интенсивности от E_a и F_M после года работы с новым вариатором (25.II.74) при $J_{под} = 240 \text{ A}$, $U_{\phi} = -6 \text{ кВ}$, $U_{го} = 2,44 E_a$.

$\cos \gamma_{\text{доп}}$, представленным на рис.35. Рабочие значения параметров и величины интенсивности приведены в таблице IV.

Таблица IV

Режим	Параметры Интенсивн.	$I_{\text{осл.}}$ [А]	$I_{\text{пог}}$ [А]	E_{α} [кВ]	F_M [Гц]	U_{ϕ} [кВ]
Внутренний пучок $R_M = 274,5 \text{ см}$	$\alpha_H = 95$ $\alpha_{KH} = 175$ $I = 3,2 \text{ мкА}$	4100	255	7	167	-2,5/-7

Снятые в этом режиме зависимости интенсивности внутреннего пучка (рис.36,37) по сравнению с соответствующими данными до коррекции частотной кривой (рис.30,31 и таблица III) показывают увеличение общей интенсивности ускорителя, обусловленное устранением фазовых потерь. Так, на рис.36 зависимость $\alpha_{KH} (E_{\alpha})$ при $F_M = 167$ Гц идет выше аналогичной зависимости на рис.30 даже при $F_M = 200$ Гц. Зависимость $\alpha_H (R_M)$ после коррекции частотной кривой также расположена выше аналогичной зависимости до коррекции во всем диапазоне радиусов установки мишени. О значительном улучшении фазового режима свидетельствует также рис.37, где для $E_{\alpha} > 7$ кВ не наблюдается спада интенсивности с ростом F_M .

Устранению фазовых потерь, вызванных понижением ускоряющего напряжения на отдельных участках частотного диапазона, способствовало также улучшение амплитудной характеристики ускоряющего напряжения (сравни U_{g1} на рис.32 и 34).

Для определения эффективности захвата в режиме ускорения было измерено время захвата по зависимости интенсивности от времени задержки включения в.ч.генератора (рис.38). Методика измерения $t_{\text{зах}}$ использовалась такая же, как описано выше в разделе 2. Время

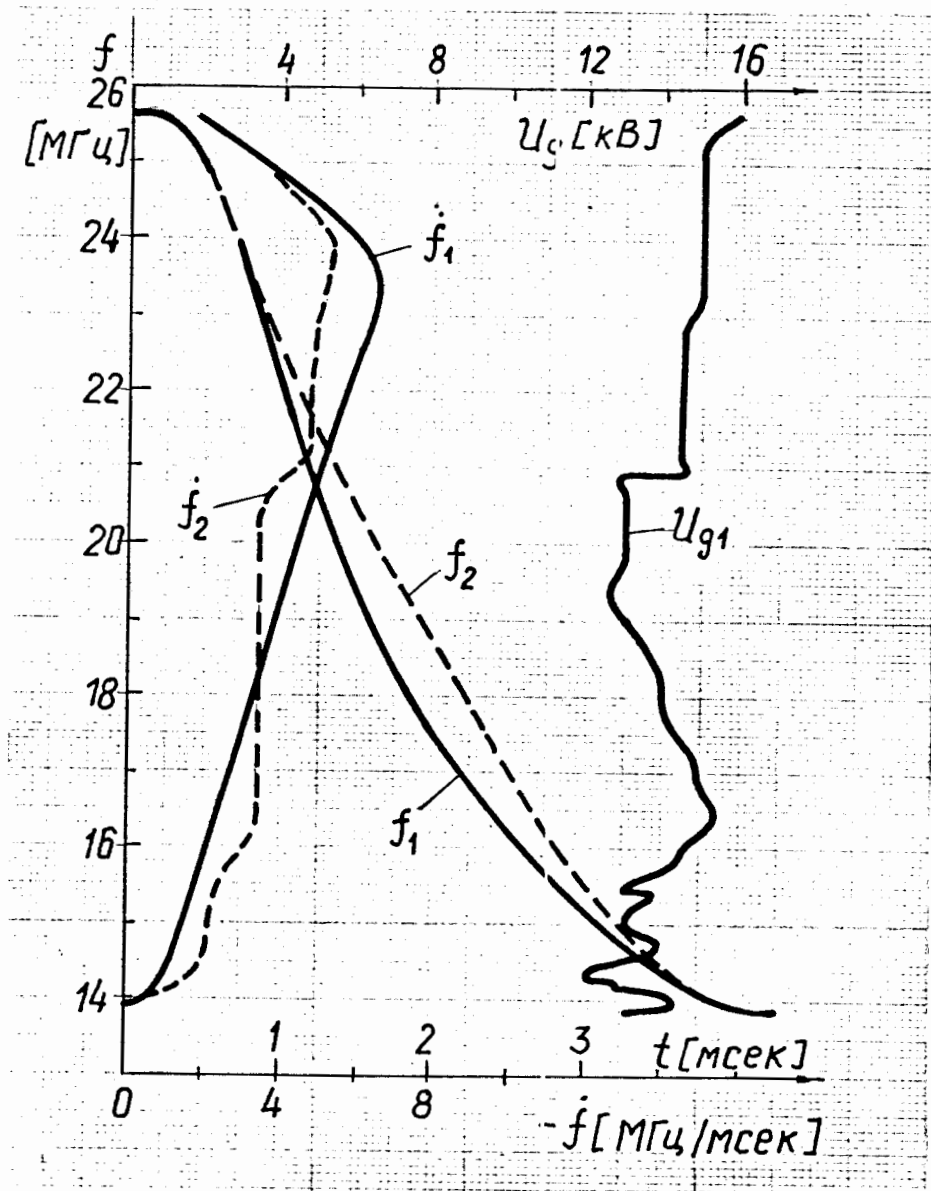


Рис. 32. Характеристики в.ч. системы $f(t)$, $f(f)$ и $U_g(f)$:
 1 - от 23.6.75 при $E_a = 7 \text{ кВ}$, $U_{g0} = 2,22 E_a$, $F_M = 167 \text{ Гц}$,
 $f_0 = -1,9 \text{ МГц/мсек}$, 2 - расчетные без фазовых
 потерь для U_{g1} .

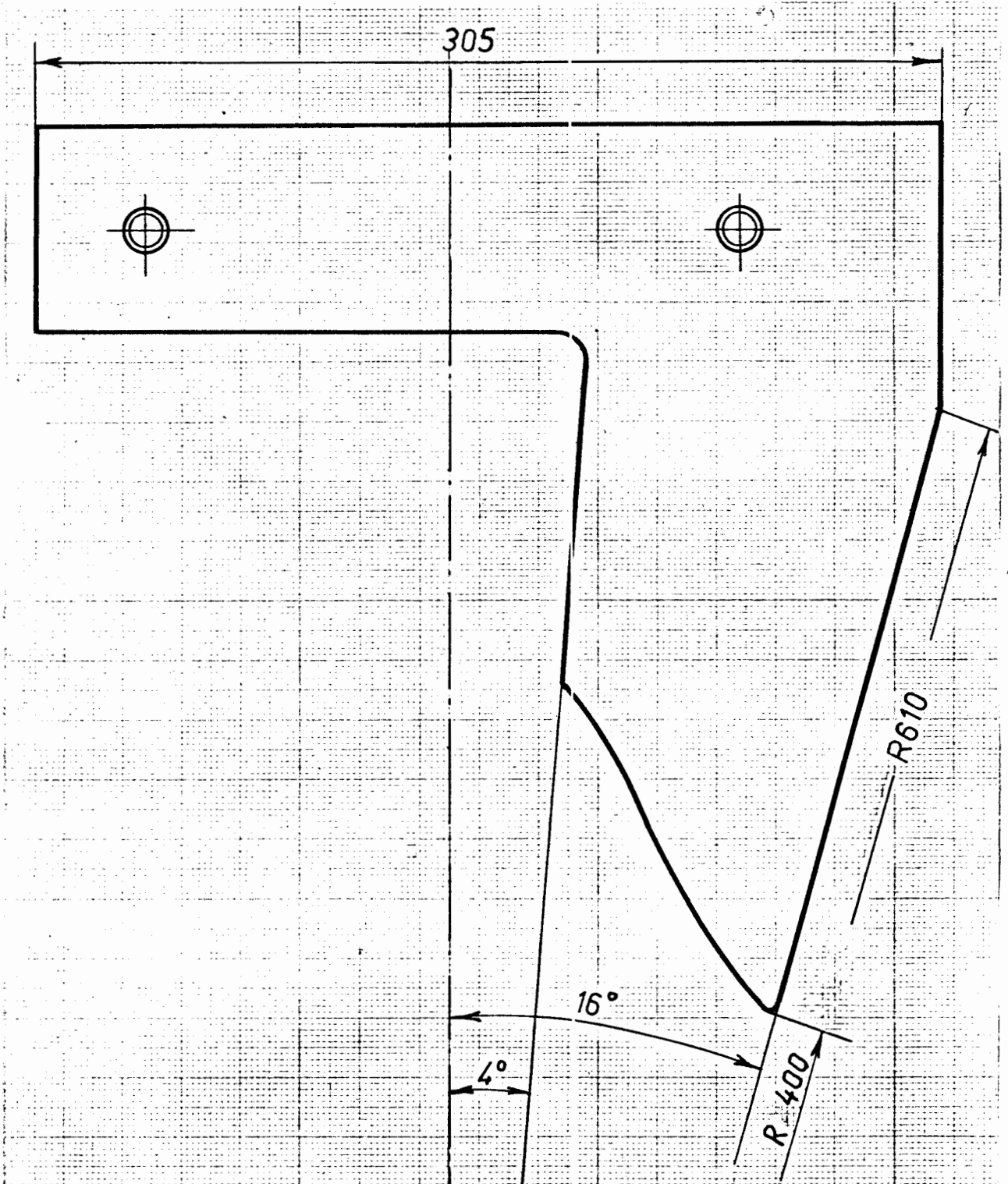


Рис. 33 . Форма пластины срезанного статорного пакета нового вариатора . М 1:2 .

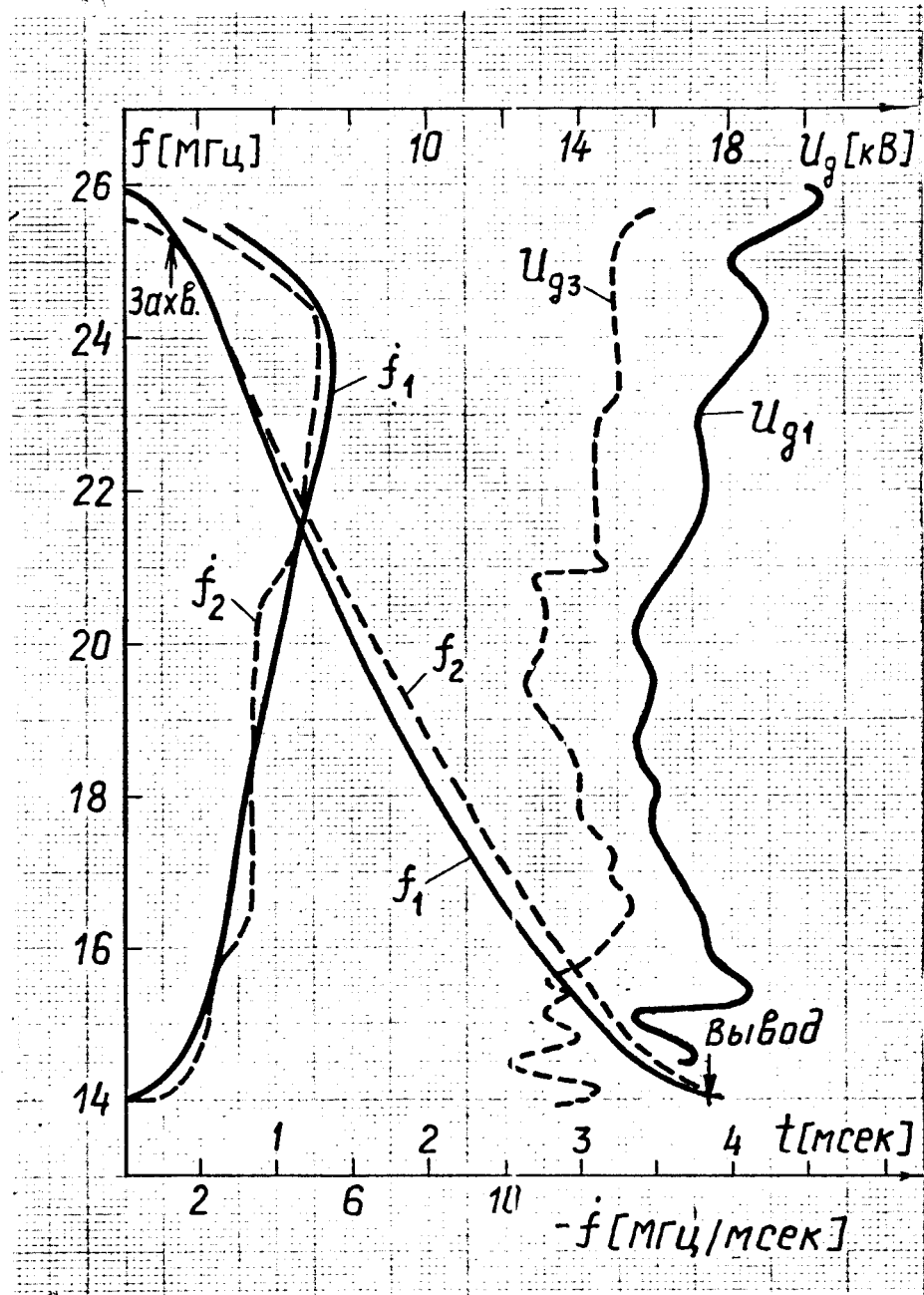


Рис. 34. Характеристики в.ч. системы $f(t)$, $f(f)$ и $U_g(f)$:
 I - после коррекции частотной кривой для устранения фазовых потерь (23.12.75), $t_{yc} / T_M = 0,57$, $E_a = 7$ кВ, $U_{g0} = 2,83 E_a$, $F_M = 167$ Гц, $f_0 = -2,5$ МГц/мсек, 2 - расчетные без фазовых потерь, U_{g3} - для расчета $f(t)$ без потерь (23,6.75).

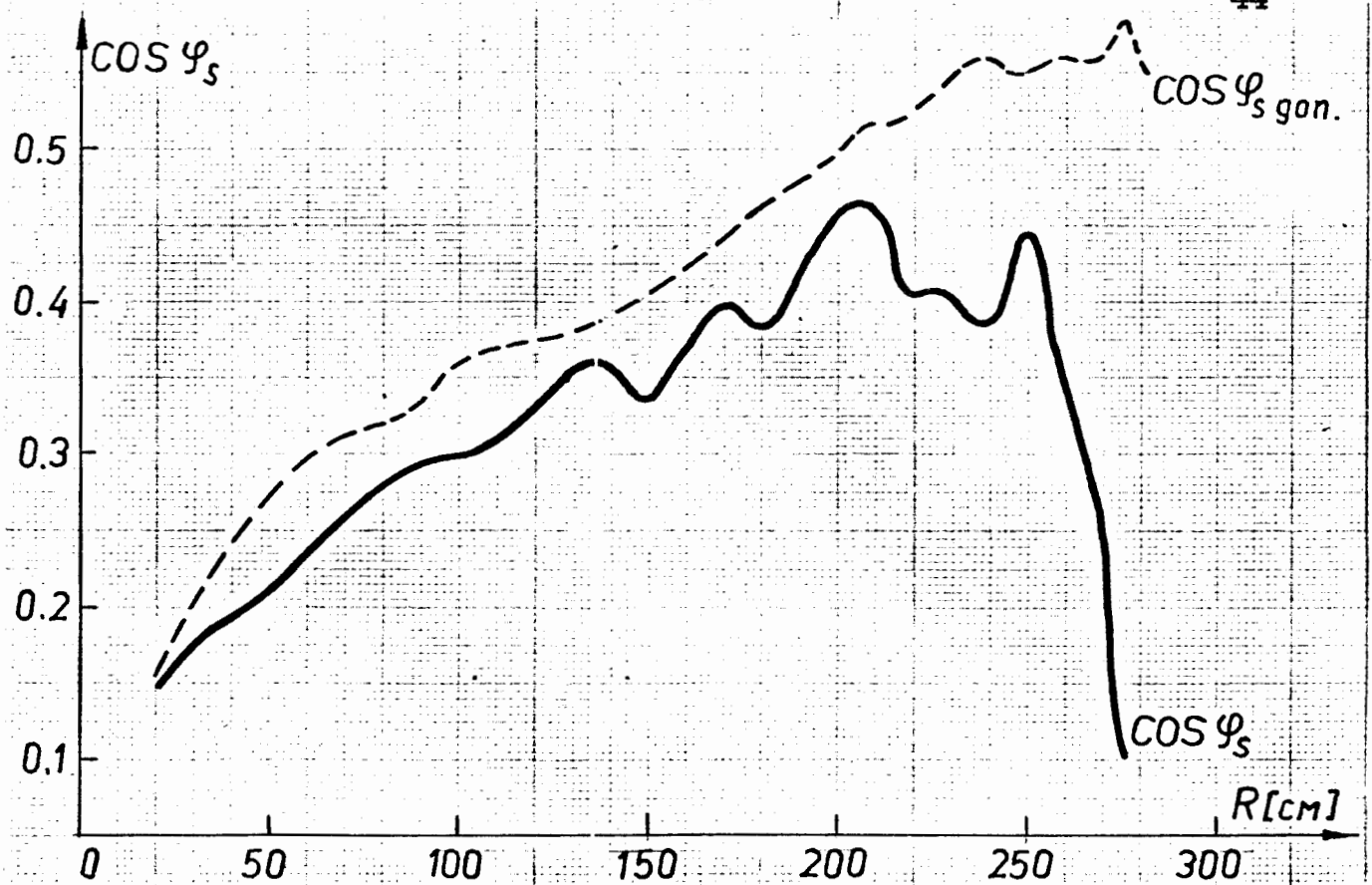


Рис. 35 . Зависимость $\cos \varphi_s$ и $\cos \varphi_{s \text{ gon.}}$ от радиуса после коррекции частотной кривой заменой двух широких пакетов на срезанные (23.12.75); $f_o = 25,52 \text{ МГц}$, $E_a = 7 \text{ кВ}$, $U_{go} = 19,8 \text{ кВ}$, $F_M = 167 \text{ Гц}$, $f_o = -2,5 \text{ МГц/мсек}$.

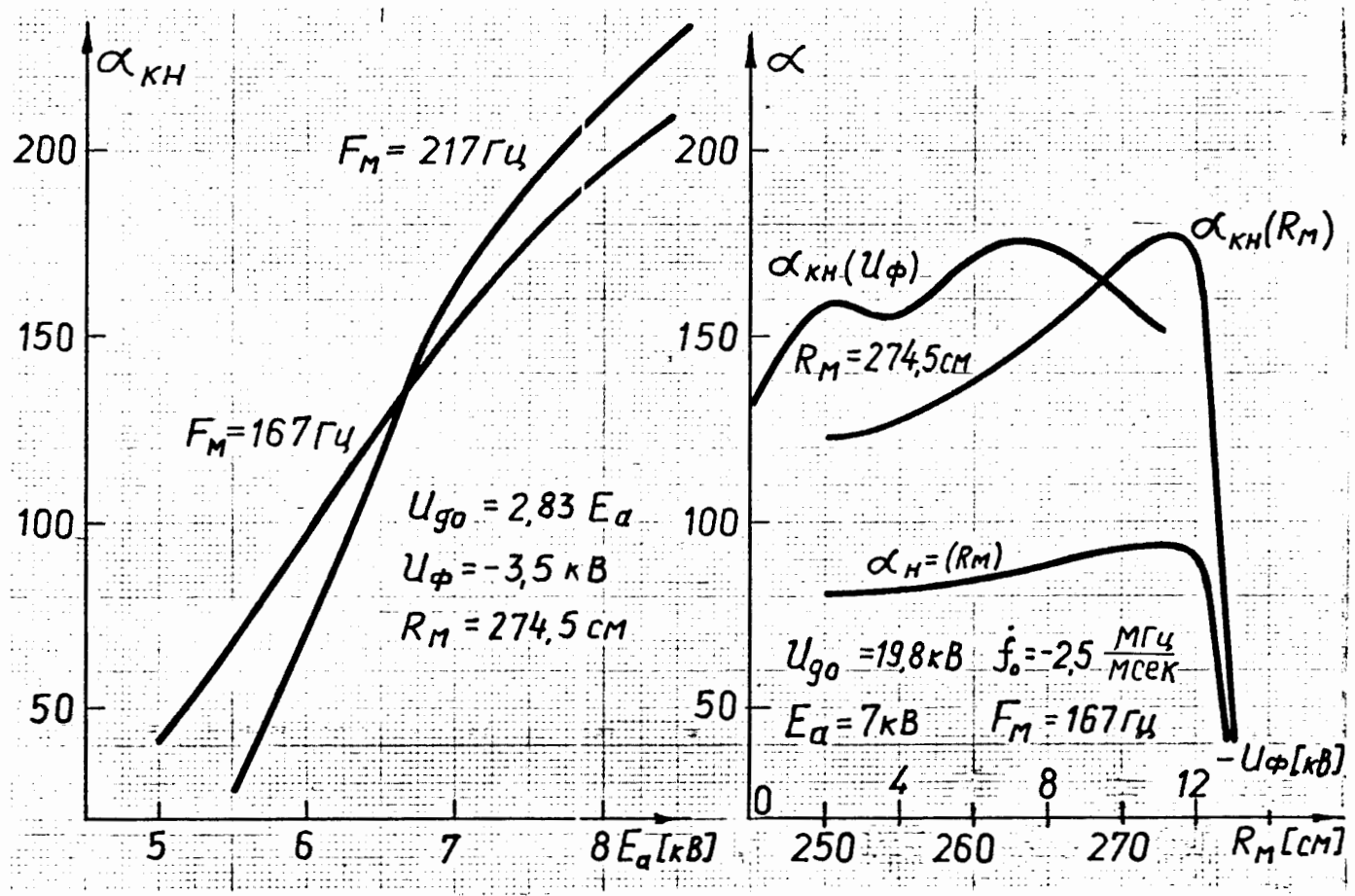


Рис. 36 . Зависимости интенсивности от E_a , F_M , U_ϕ и R_M после коррекции частотной кривой (23.12.75);

захвата получилось равным $t_{зах.} \approx 50$ мксек, а эффективность захвата $\epsilon_{зах.} = \frac{t_{зах.}}{T_M} = 0,0083$, что в два с лишним раза больше, чем с вариатором старой конструкции.

Однако в процессе последующей эксплуатации ускорителя из-за конструктивных недостатков в креплении роторных дисков параметры в.ч. системы ухудшились (уменьшилось U_d на частотах $20+2i$ МГц), о чем свидетельствуют также зависимости $\alpha_{кн}(E_a)$, $\alpha_{кн}(F_M)$, $\alpha_{кн}(J_{осн})$ и $\alpha_{кн}(R_M)$, изображенные на рис.39, 40, 41 и 42. Кроме того, установка двух срезанных пакетов вместо широких повысила верхнюю частоту до 25,98 МГц, уменьшив тем самым $t_{ус}/T_M$ до 0,57.

Для восстановления прежнего значения $t_{ус}/T_M$ и понижения f_{β} с целью уменьшения $J_{осн.}$ при максимальной интенсивности один узкий пакет был заменен на широкий. Расположение статорных пакетов в этом случае показано на рис.43, а амплитудная и частотная характеристики приведены на рис.44. Для этого случая после перестройки в.ч. генератора были измерены зависимости интенсивности от E_a , F_M , U_{ϕ} и R_M , показанные на рис.45 и 46. Как видно из рис.45 фазовый режим достаточно хороший, так как кривые $\alpha_{кн}$ от F_M при $E_a \approx 7$ кВ не спадают вплоть до $F_M \approx 220$ Гц. Для последующей эксплуатации был установлен режим работы ускорителя, указанный в таблице У.

Таблица У

Режим работы	Параметры	$J_{осн.}$ [А]	$J_{пог.}$ [А]	E_a [кВ]	F_M [Гц]	U_{ϕ} [кВ]
	Интенсивн.					
Внутренний пучок $R_M=274,5$ см	$\alpha_H = 80$ $\alpha_{кн} = 150$ $i \approx 2,8$ мкА	4420	265	7	167	-4

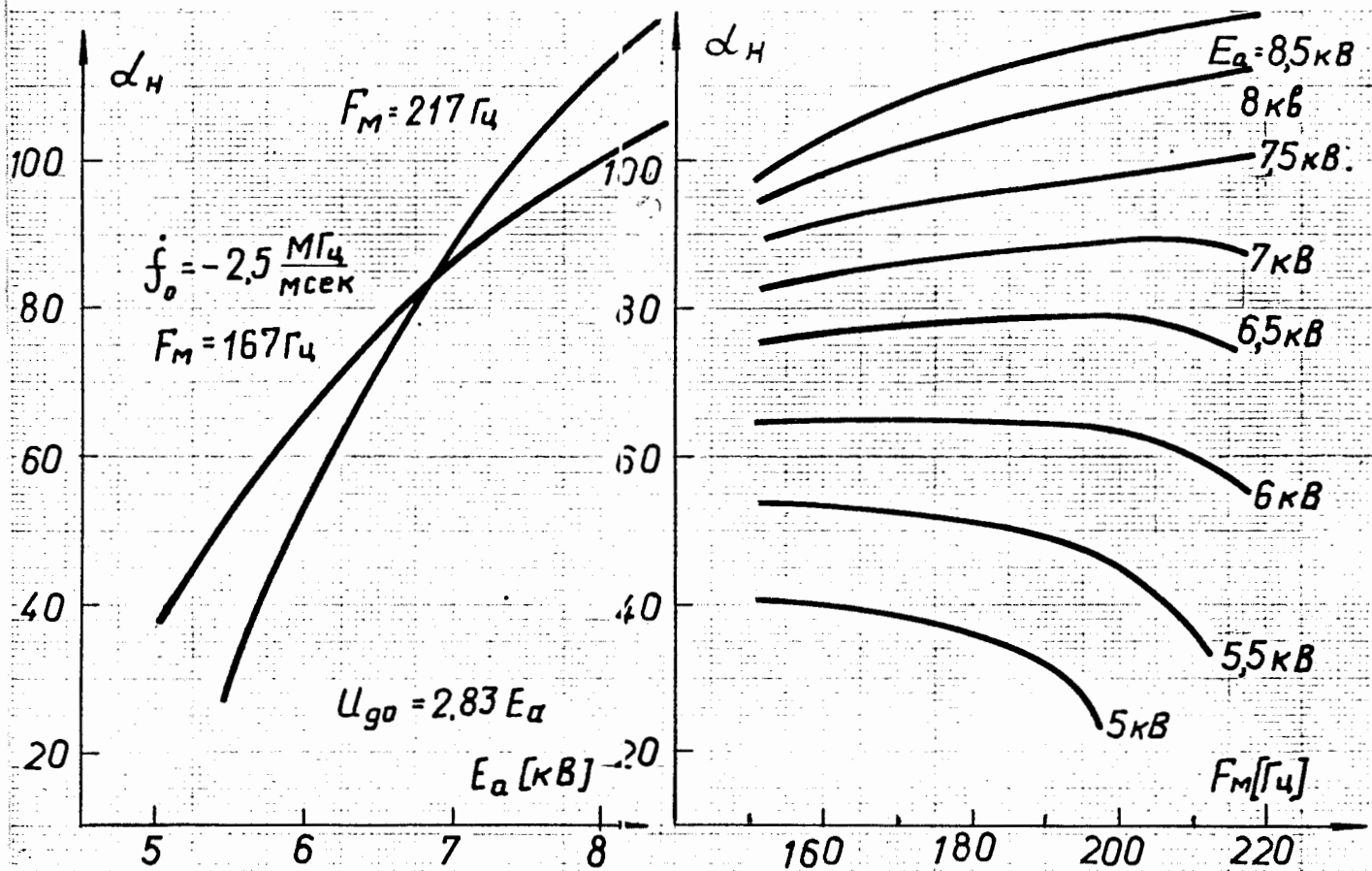


Рис. 37. Зависимости интенсивности от E_α и F_M после коррекции частотной кривой (23.12.75) $I_{осн.} = 4400$ А, $I_{пог} = 255$ А, $U_\phi = -7$ кВ, $R_M = 274,5$ см.

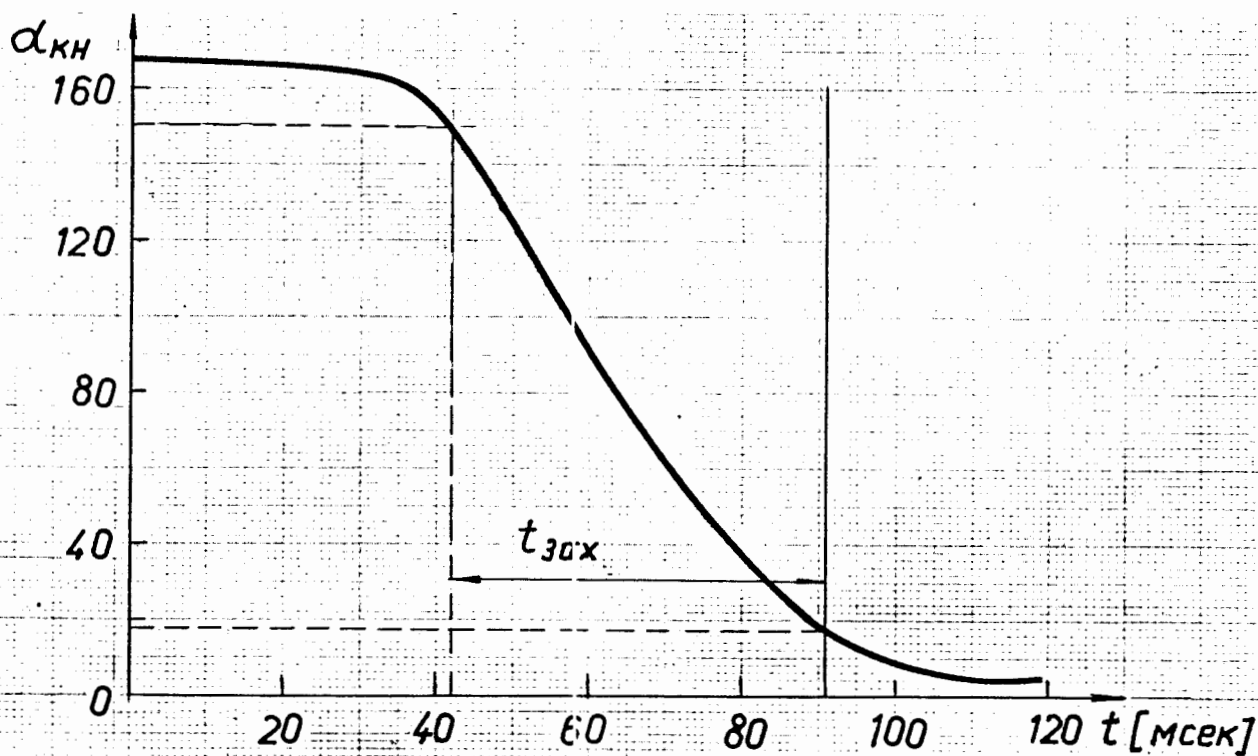


Рис. 38. Зависимость интенсивности от времени задержки включения в.ч. генератора (23.12.75) при $I_{осн.} \approx 4400$ А, $I_{пог} = 255$ А, $E_\alpha = 7$ кВ, $U_{го} = 19,8$ кВ, $F_M = 167$ Гц, $f_0 = -2,5$ $\frac{\text{МГц}}{\text{мсек}}$ и $U_\phi = -6$ кВ.

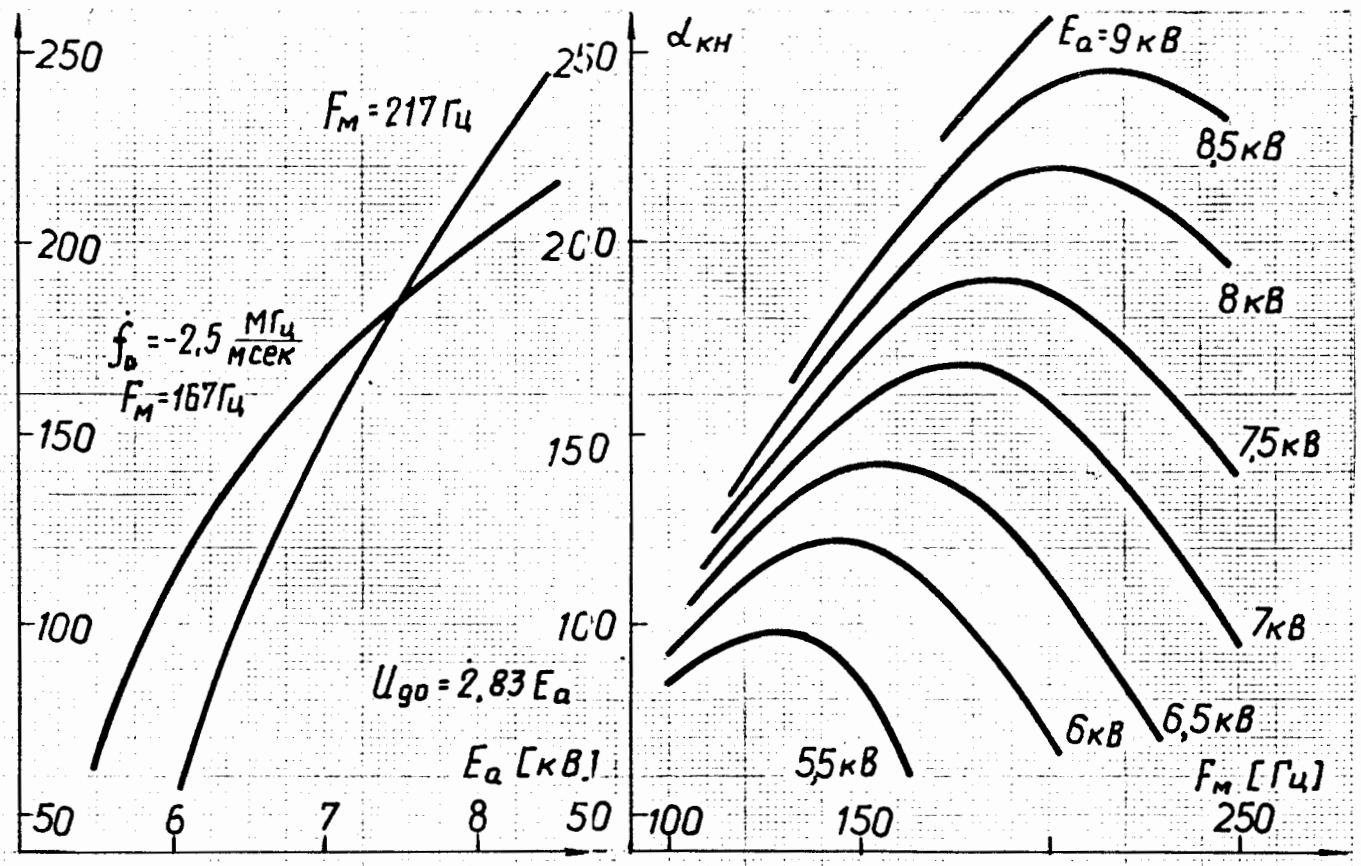


Рис. 39 . Зависимости интенсивности от E_a и F_m от 6.I.76 при $I_{осн} \approx 4400 \text{ А}$, $I_{под} = 265 \text{ А}$, $U_{\phi} = -9 \text{ кВ}$.

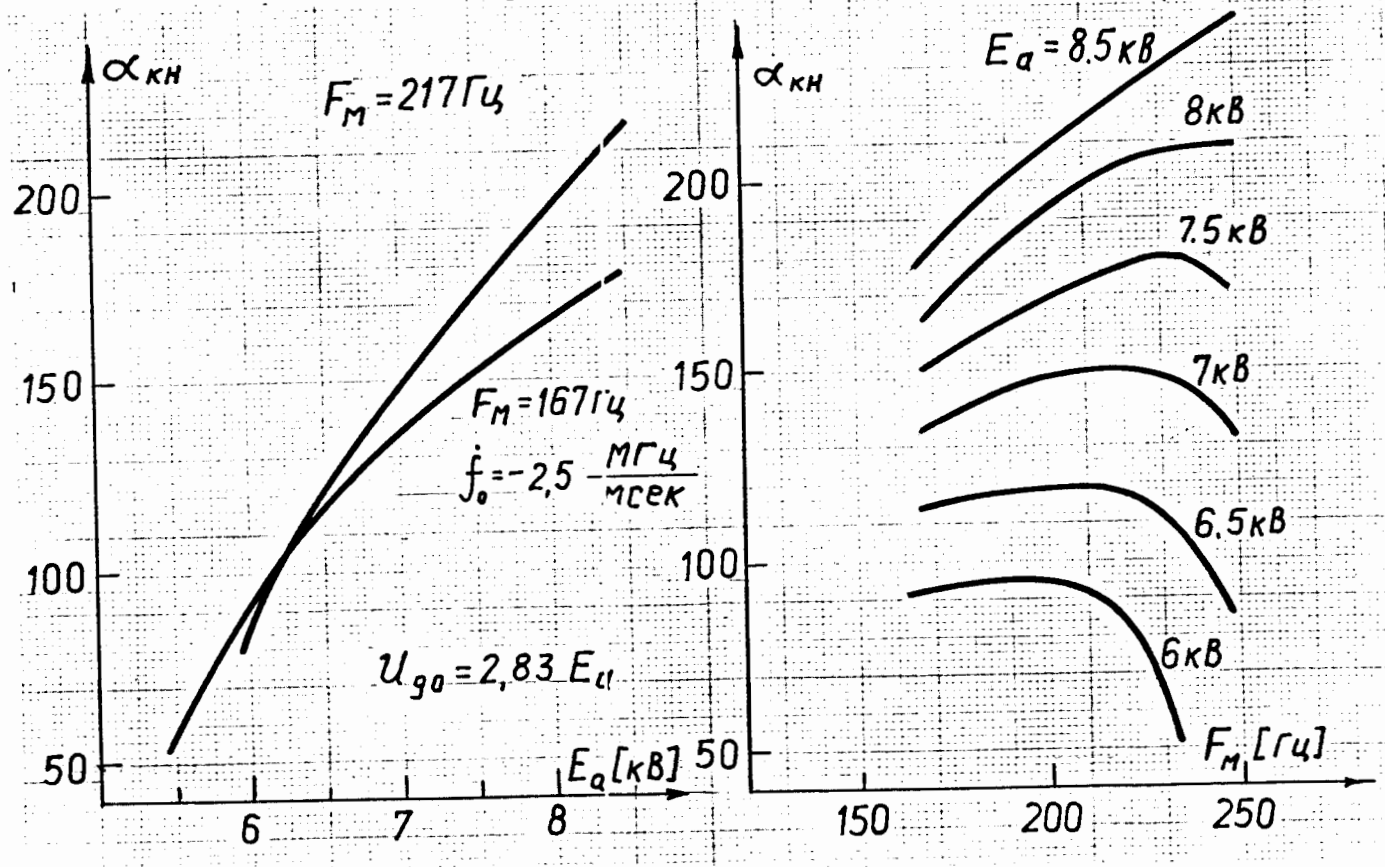


Рис. 40 . Зависимости интенсивности от E_a и F_m от 13.I.76 при $I_{осн} \approx 4400 \text{ А}$, $I_{под} = 265 \text{ А}$, $U_{\phi} = -9 \text{ кВ}$.

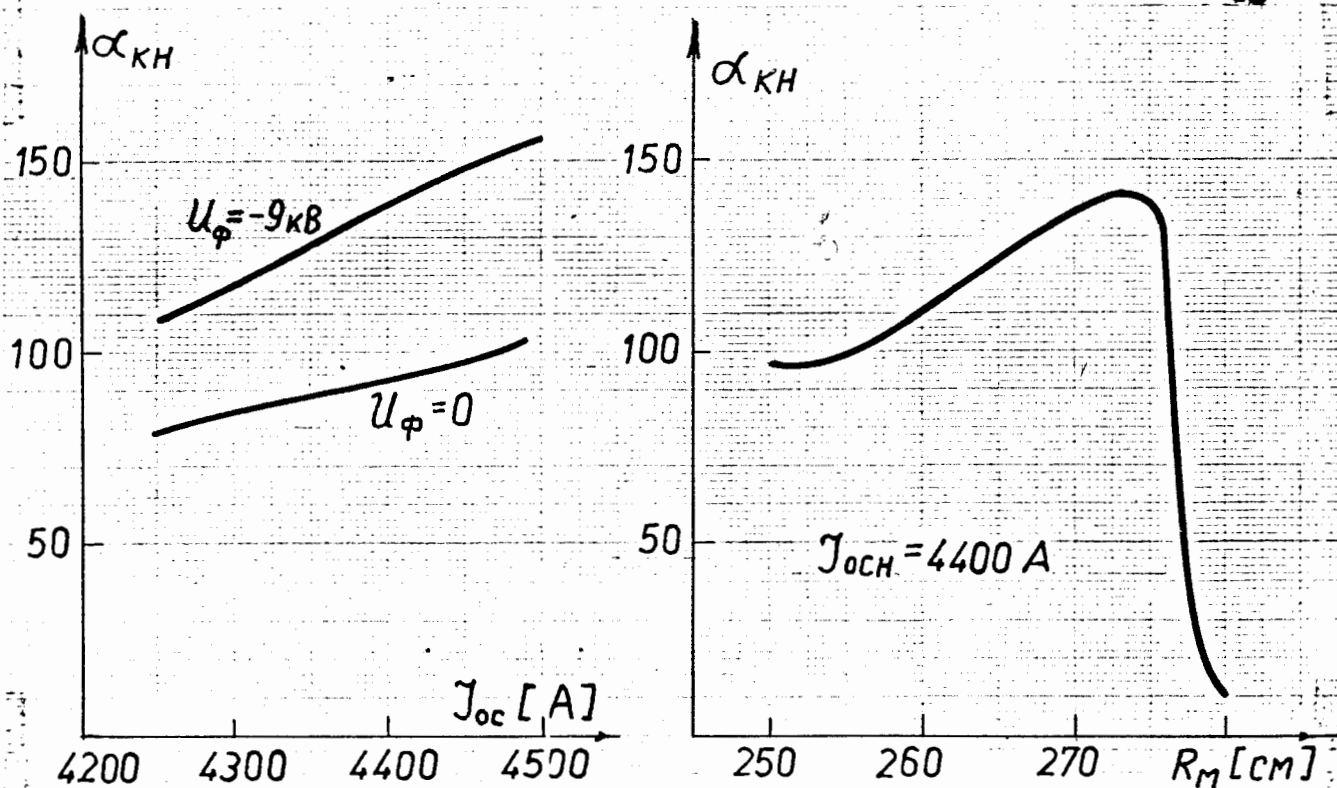


Рис. 41. Зависимости интенсивности от $J_{осн}$ и радиуса установки мишени R_m от 13.1.76 при $J_{под} = 265 \text{ А}$, $E_a = 7 \text{ кВ}$, $U_{го} = 2,83 E_a$, $F_m = 167 \text{ Гц}$, $f_0 = -2,5 \text{ МГц/мсек}$ и $U_{\phi} = -9 \text{ кВ}$.

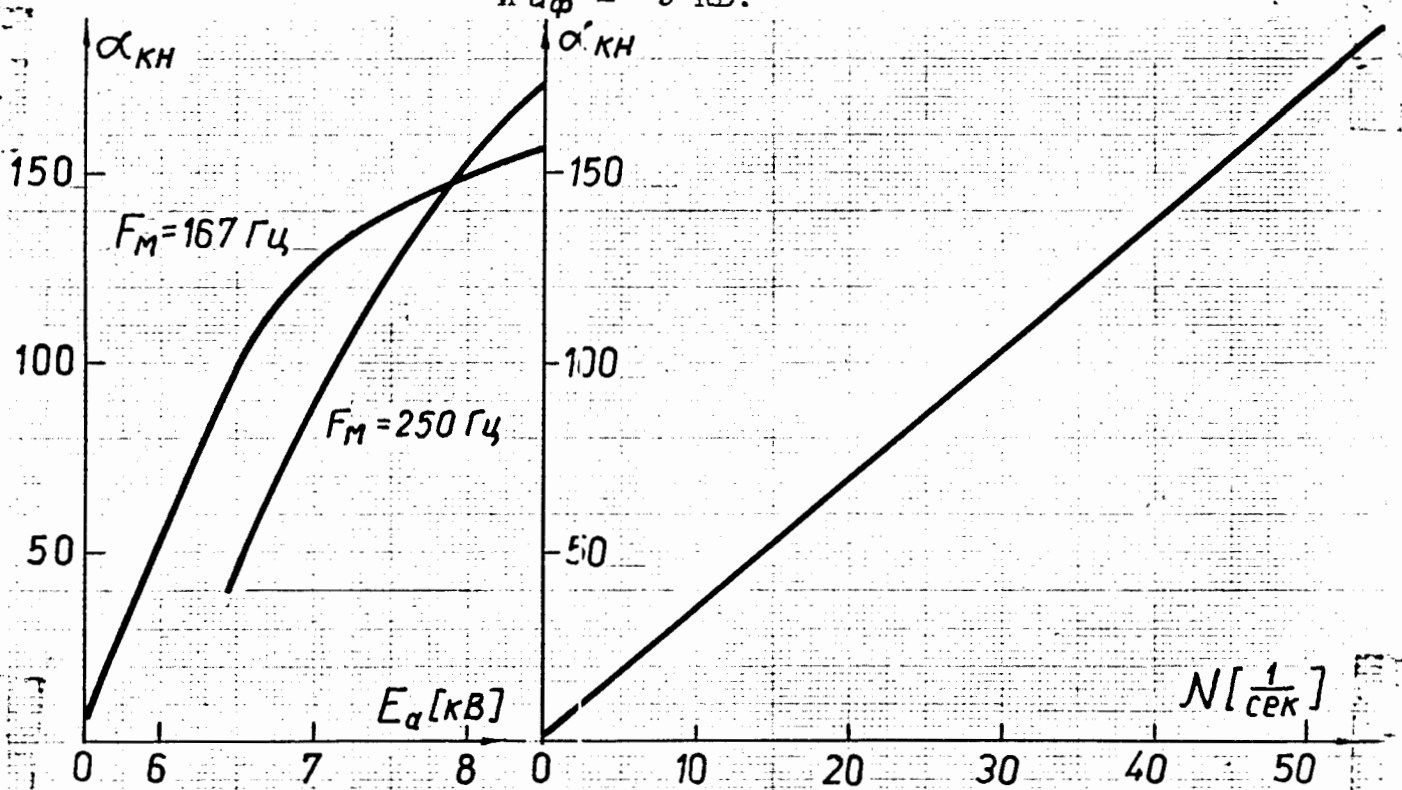


Рис. 42. Зависимости интенсивности от E_a и связь показаний камеры КН- α_{KH} со счетом нейтронного монитора физиков N [1/сек] (20.1.76); $J_{осн} \approx 4400 \text{ А}$, $J_{под} = 265 \text{ А}$, $U_{\phi} = -10 \text{ кВ}$.

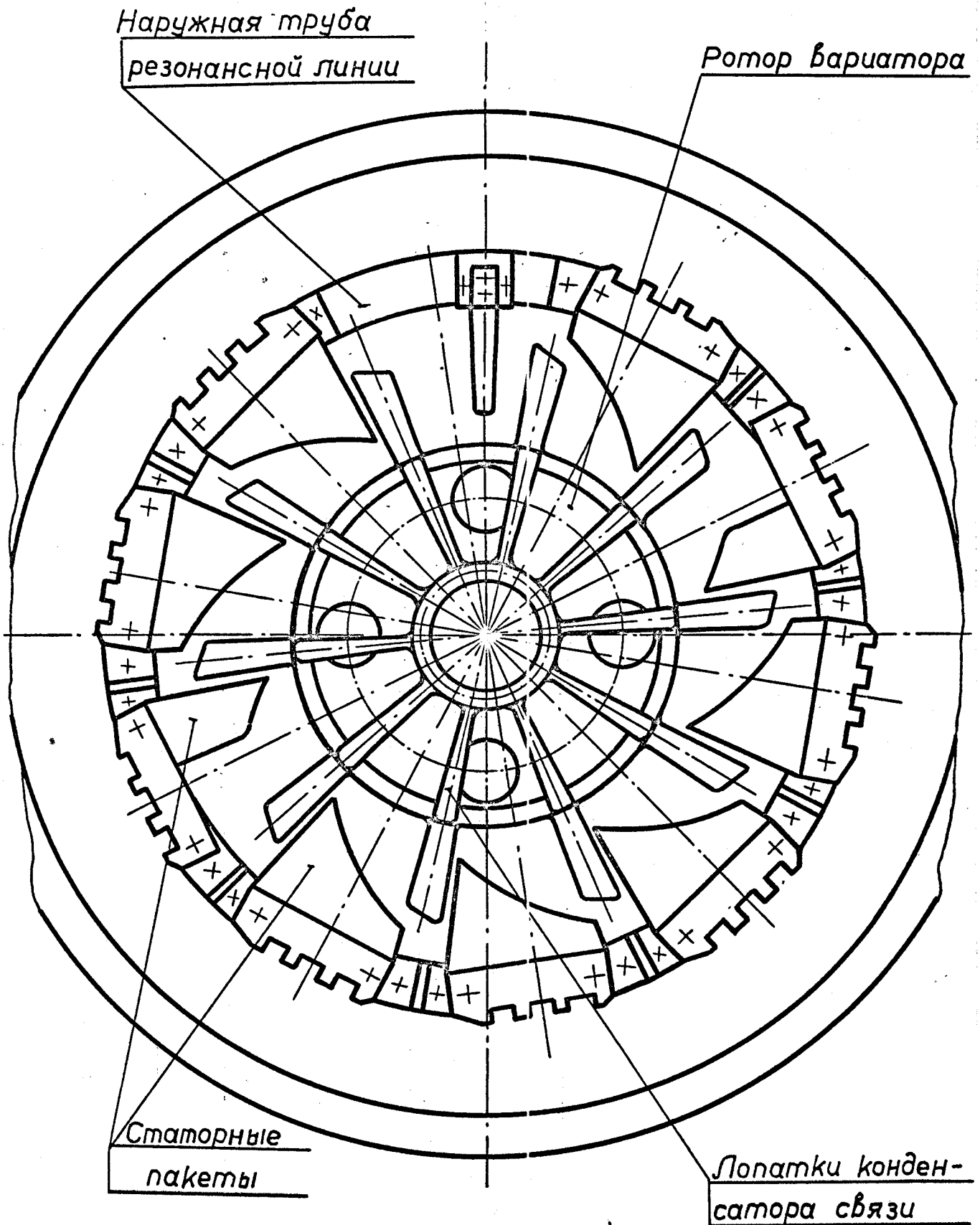


Рис. 43. Схематический чертеж нового вариатора после коррекции частотной кривой.

В течение эксплуатации ускорителя до планового ремонта в ноябре 1976 г. указанные выше конструктивные недостатки нового вариатора не позволяли поддерживать интенсивность на уровне, достигнутом после его установки и тщательной настройки в.ч. системы в ноябре 1973 г. Так, изображенные на рис. 47 зависимости $\cos \varphi_s$ и $\cos \varphi_{s_{\text{гон}}}$ от радиуса показывают наличие значительных фазовых потерь, обусловленных понижением ускоряющего напряжения (U_g от 6.11.76 г. на рис. 49). До ремонта были сняты приведенные на рис. 48 зависимости интенсивности выведенного пучка от напряжения на фокусирующих электродах, а также показаний камеры "КН" от радиуса установки пробника с мишенью из Be.

Перед разборкой ускорителя была измерена мощность высокочастотных потерь в резонансной системе. Во время ремонта были улучшены контакты, а также усилена стяжка между дисками ротора вариатора и между ротором и коллекторным конденсатором. После сборки ускорителя снова были проведены измерения мощности высокочастотных потерь по частотному диапазону.

Сравнение мощностей потерь до ремонта и после показало, что улучшение контактов уменьшило высокочастотные потери в резонансной системе примерно на 20%. Это привело к увеличению ускоряющего напряжения в районе частот захвата на 2-3 кВ, что хорошо видно на рис. 49, где изображены амплитудно-частотные характеристики ускорителя после ремонта и для сравнения показана также кривая $U_g(f)$ от 6.11.76 г. (до ремонта).

Об улучшении фазового режима после ремонта свидетельствуют графики $\cos \varphi_s$ и $\cos \varphi_{s_{\text{гон}}}$ на рис. 50 (сравни с рис. 47), а также

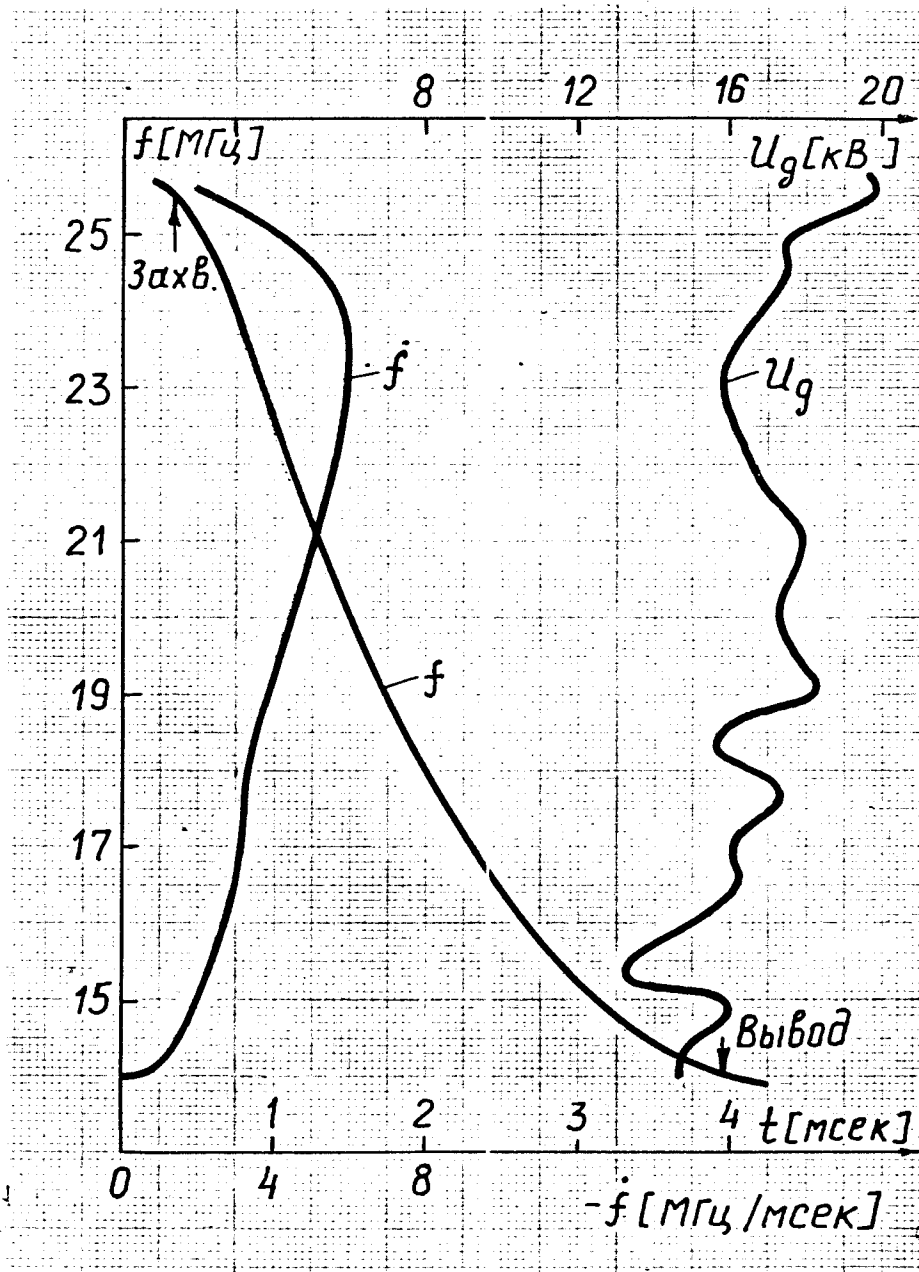


Рис. 44 . Характеристики в.ч. системы с 7 широкими, 2 срезанными и 1 узким статорными пакетами (30.3.76)
 при $E_a = 7$ кВ, $U_{g0} = 2,79 E_a$, $F_m = 167$ Гц, $-f_0 = 2,12 \frac{\text{МГц}}{\text{мсек}}$

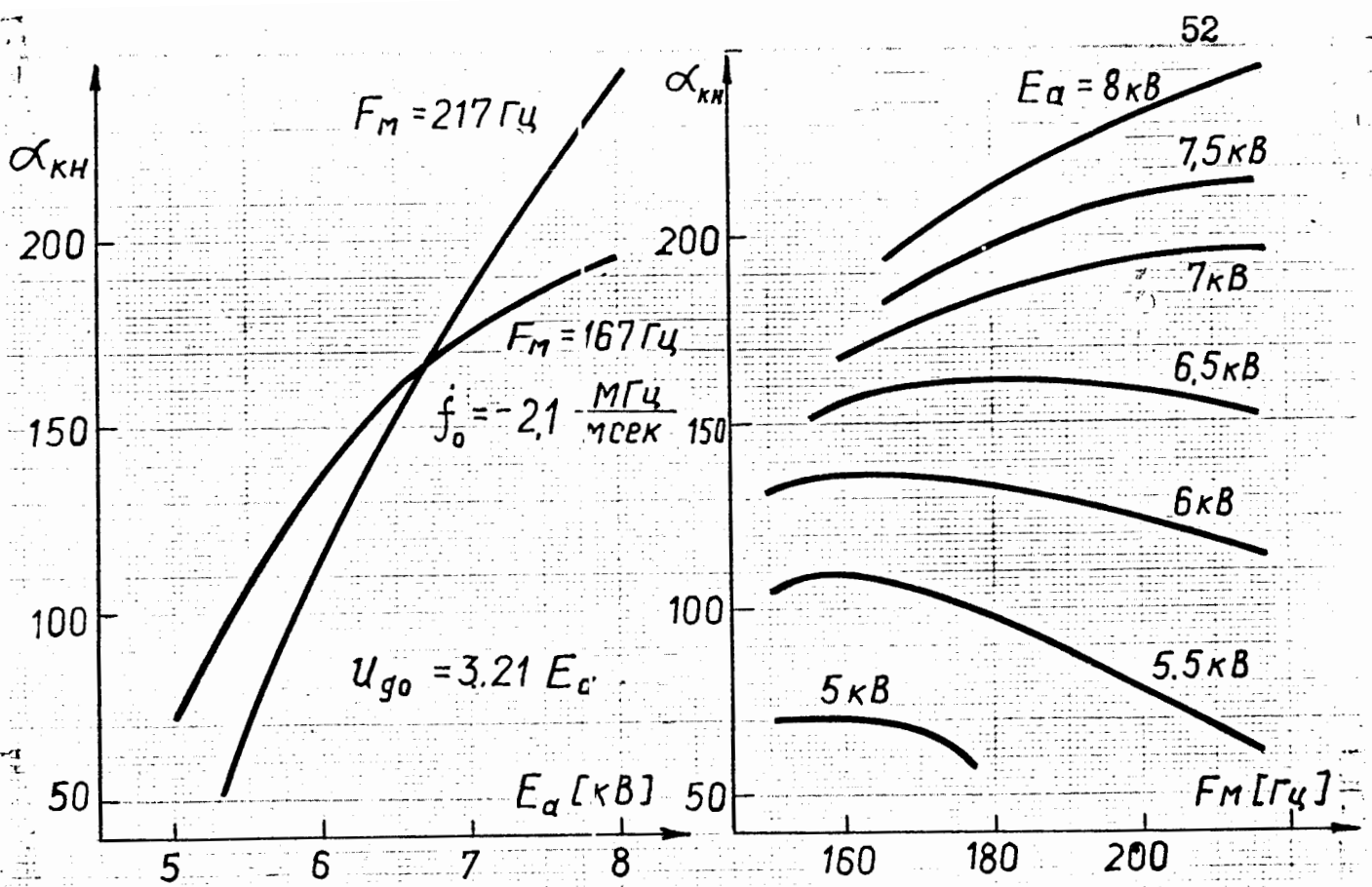


Рис. 45. Зависимости интенсивности от E_a и F_M после перестройки в.ч. генератора (I3.4.76) при $J_{осн} = 4400A$, $J_{ног} = 260A$, $U_{\phi} = -10$ кВ.

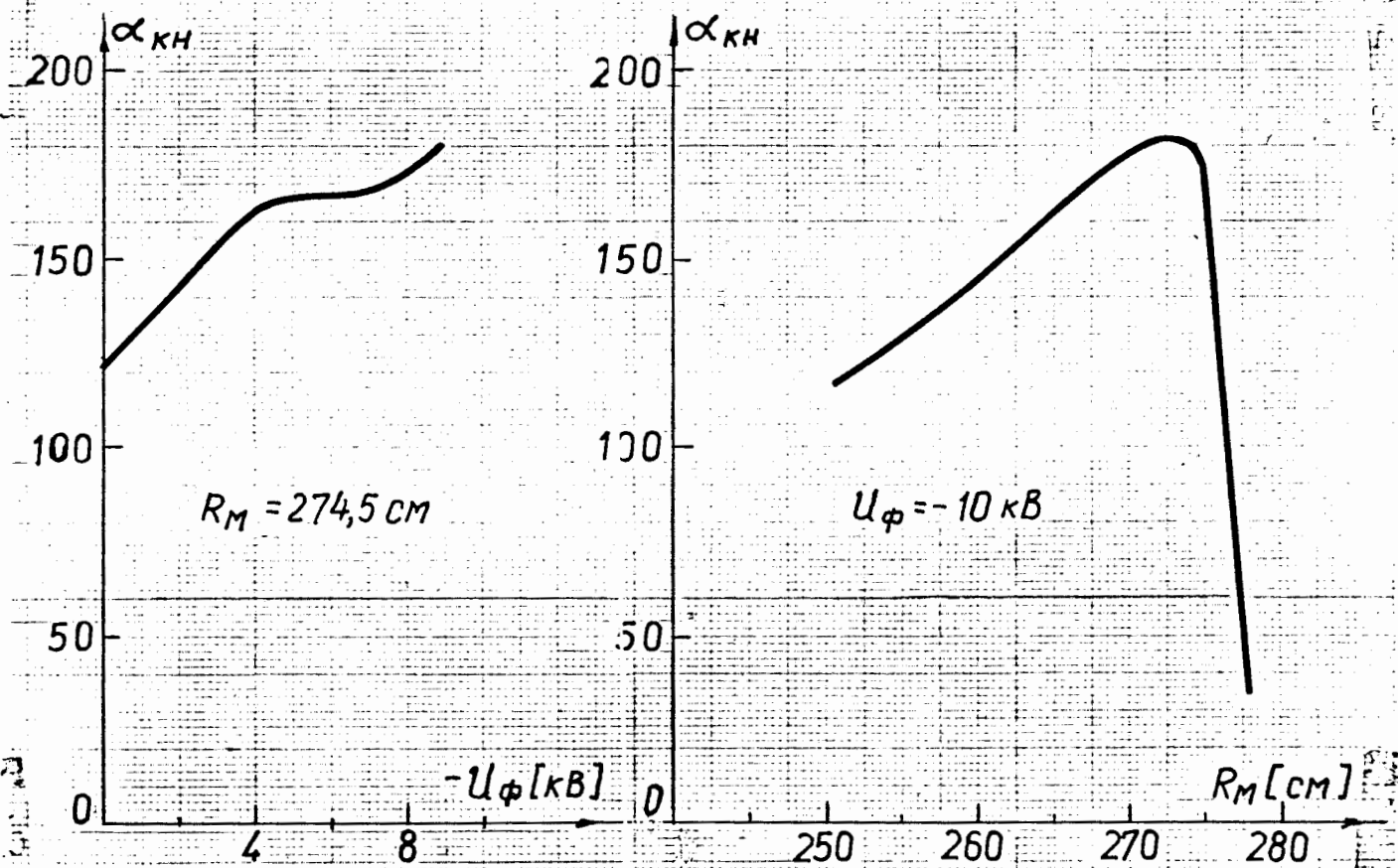


Рис. 46. Зависимости интенсивности от U_{ϕ} и R_M после перестройки в.ч. генератора (I3.4.76) при $J_{осн} = 4400A$, $J_{ног} = 260A$, $E_a = 7$ кВ, $U_{g0} = 22.5$ кВ, $F_M = 167$ Гц, $f_0 = -2, \frac{\text{МГц}}{\text{мсек}}$.

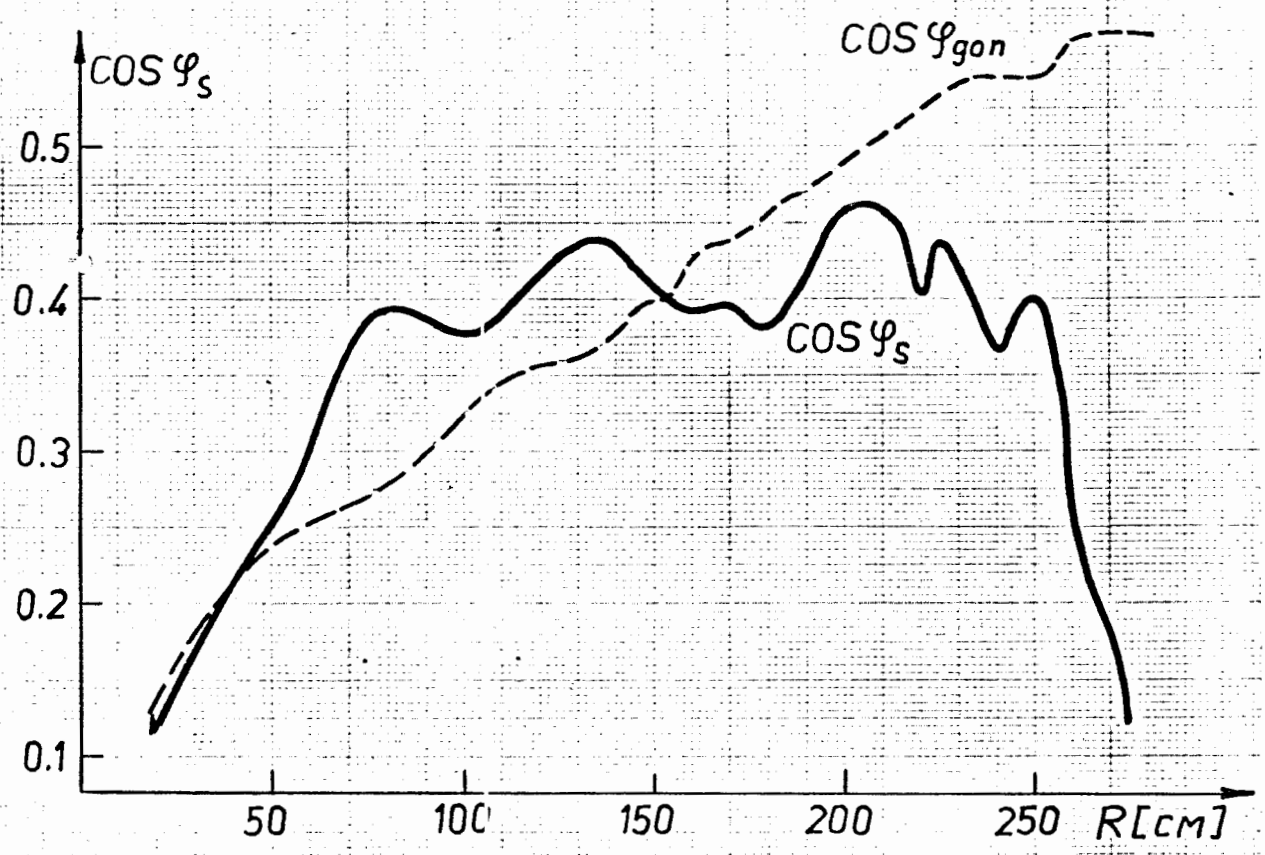


Рис. 47. Зависимости $\cos \varphi_s$ и $\cos \varphi_{гон}$ от радиуса перед ремонтом ускорителя (6.II.76) при $f_0 = 25,52$ МГц, $E_a = 7$ кВ, $U_{го} = 17,9$ кВ, $F_M = 167$ Гц, $\dot{f}_0 = -1,9$ МГц/мсек.

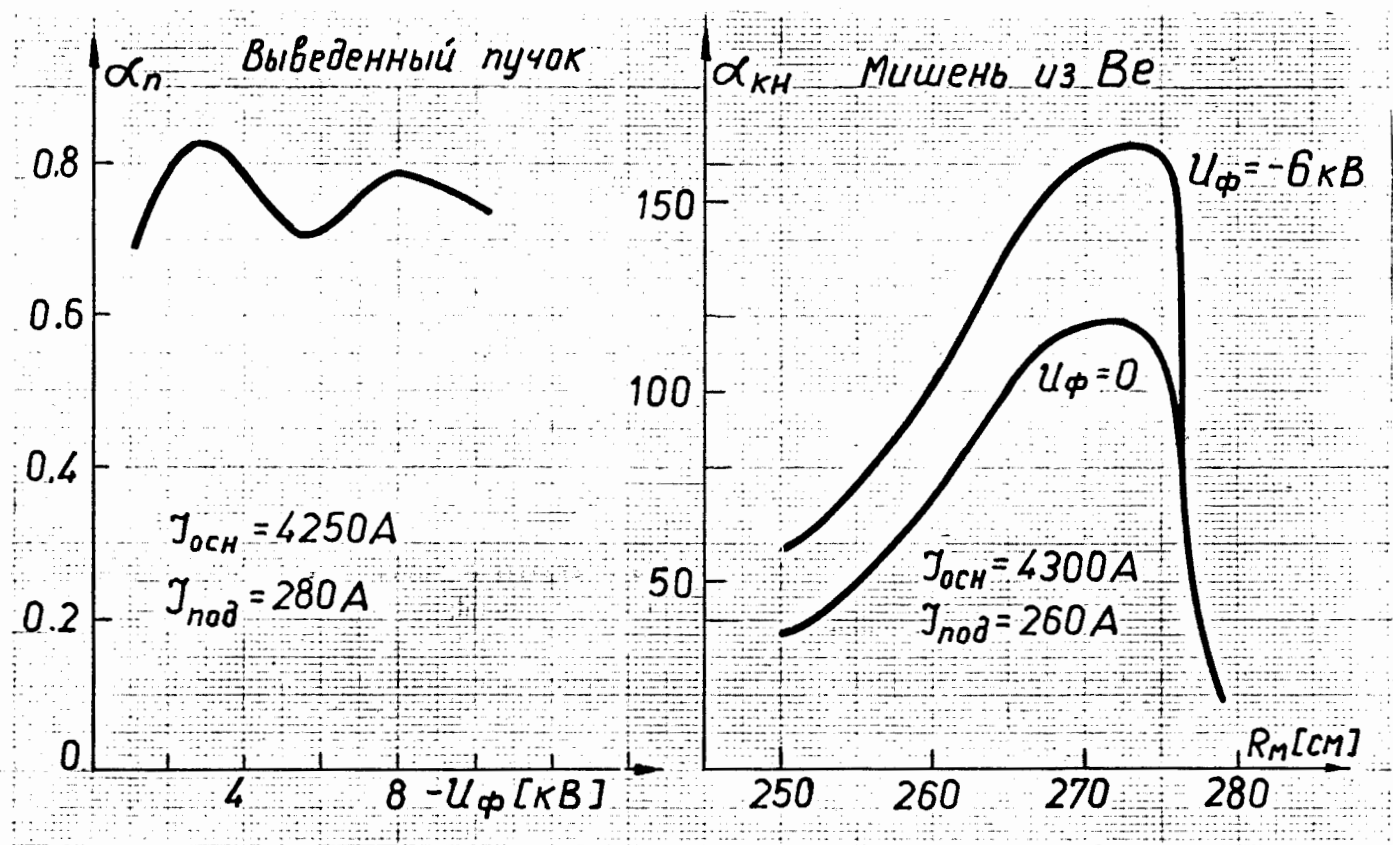


Рис. 48. Зависимости интенсивности от фокусирующего напряжения (выведенный пучок) и от радиуса мишени из Be перед ремонтом синхротрона (6.II.76) при $E_a = 7$ кВ, $U_{го} = 17,9$ кВ, $F_M = 167$ Гц, $\dot{f}_0 = -1,9$ МГц/мсек.

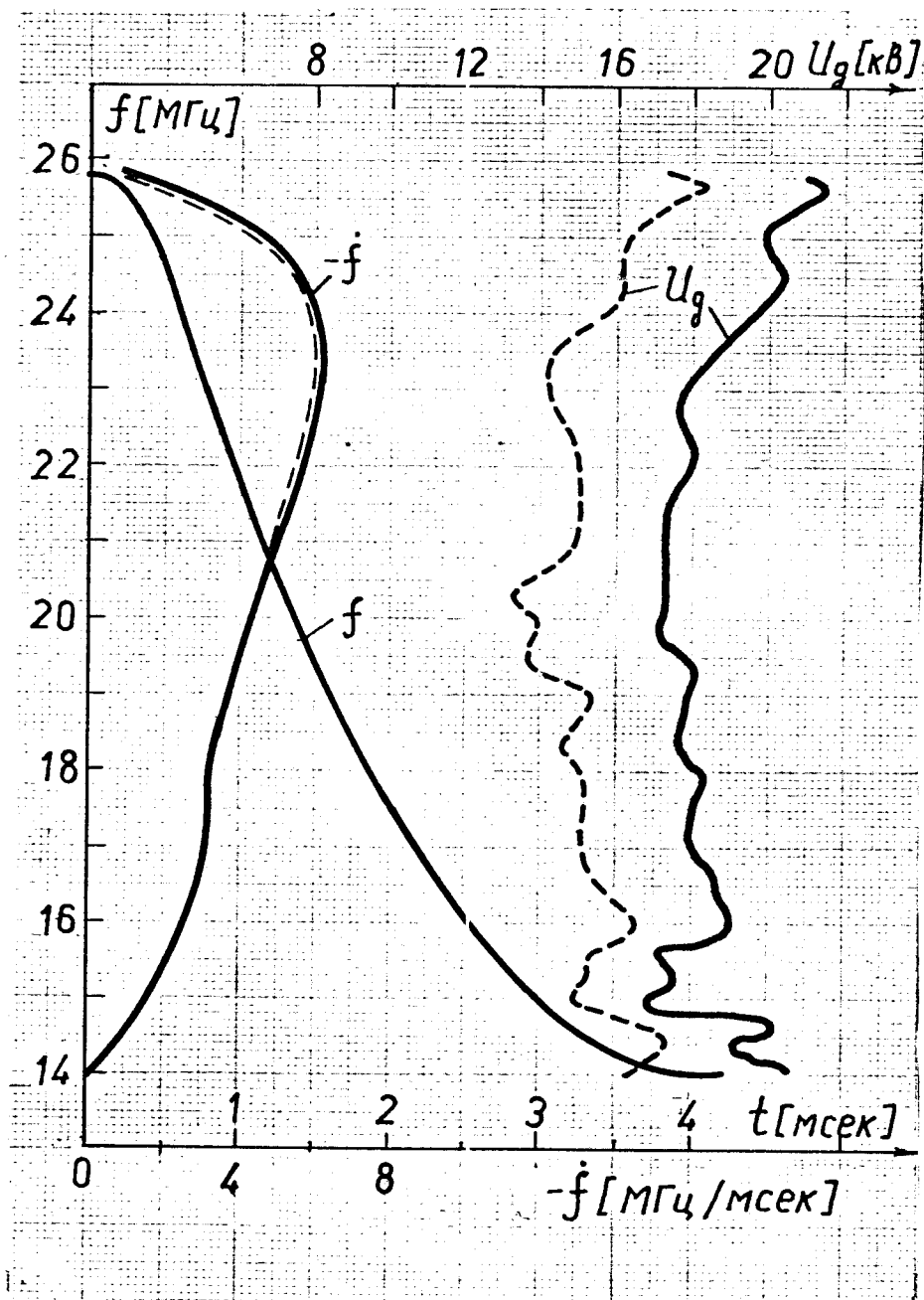


Рис. 49. Характеристики в.ч. системы ускорителя после ремонта (13.II.76) при $E_a = 7$ кВ, $U_{g0} = 2,97E_a$, $F_M = 167$ Гц, $\dot{f}_0 = -2,45$ МГц/мсек (----- $U_g(f)$ перед ремонтом (6.II.76), $U_{g0} = 2,56E_a$, $\dot{f}_0 = -1,9$ МГц/мсек).

характер зависимостей интенсивности от частоты модуляции, изображенных на рис.5I. Величина интенсивности, приведенная на этом рисунке, для $E_a = 8$ кВ и $F_m = 217$ Гц, равная $\alpha_{KH} = 286$, соответствует току внутреннего пучка примерно 5,3 мкА.

Значение интенсивности и параметров ускорителя после ремонта в рабочем режиме дано в таблице VI.

Таблица VI

Режим работы	Параметры	$I_{осн.}$ [А]	$I_{под}$ [А]	E_a [кВ]	F_m [Гц]	U_ϕ [кВ]
	Интенсивн.					
Внутр. пучок $R_M = 274,5$ см	$\alpha_H = 105$ $\alpha_{KH} = 213$ $I \approx 4$ мкА	4400	250	7	167	-6

Проведенные работы по коррекции фазового режима синхроциклотрона с помощью изменения формы статорных пакетов показывают, что получаемое в результате этого увеличение интенсивности в процессе длительной эксплуатации не является стабильным. Это связано как правило с увеличением в.ч. потерь в резонансной системе ускорителя, приводящим к перераспределению ускоряющего напряжения по частотному диапазону. Более эффективная коррекция фазового режима синхроциклотрона может быть осуществлена при помощи анодного модулятора с управлением по заданной программе, позволяющей перераспределять амплитуды ускоряющего напряжения по частотному диапазону в процессе работы.

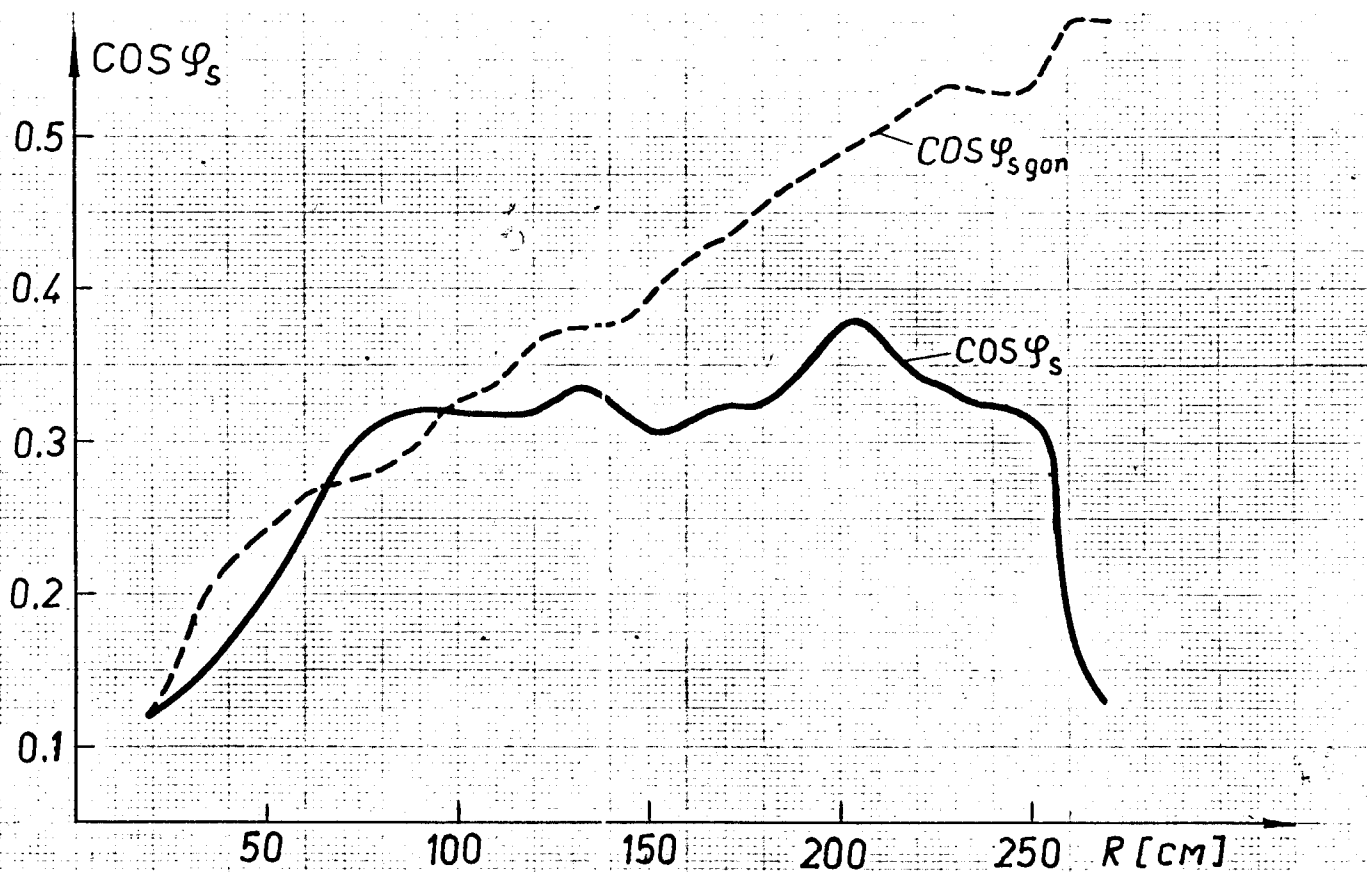


Рис. 50 . Зависимости $\cos \varphi_s$ и $\cos \varphi_{s\text{гон}}$ от радиуса после ремонта синхроциклотрона (ИЗ.12.76) при $f_0 = 25,52 \text{ МГц}$, $E_a = 7 \text{ кВ}$, $U_{\text{го}} = 20,8 \text{ кВ}$, $F_M = 167 \text{ Гц}$, $\dot{f}_0 = -2,45 \text{ МГц/мсек}$

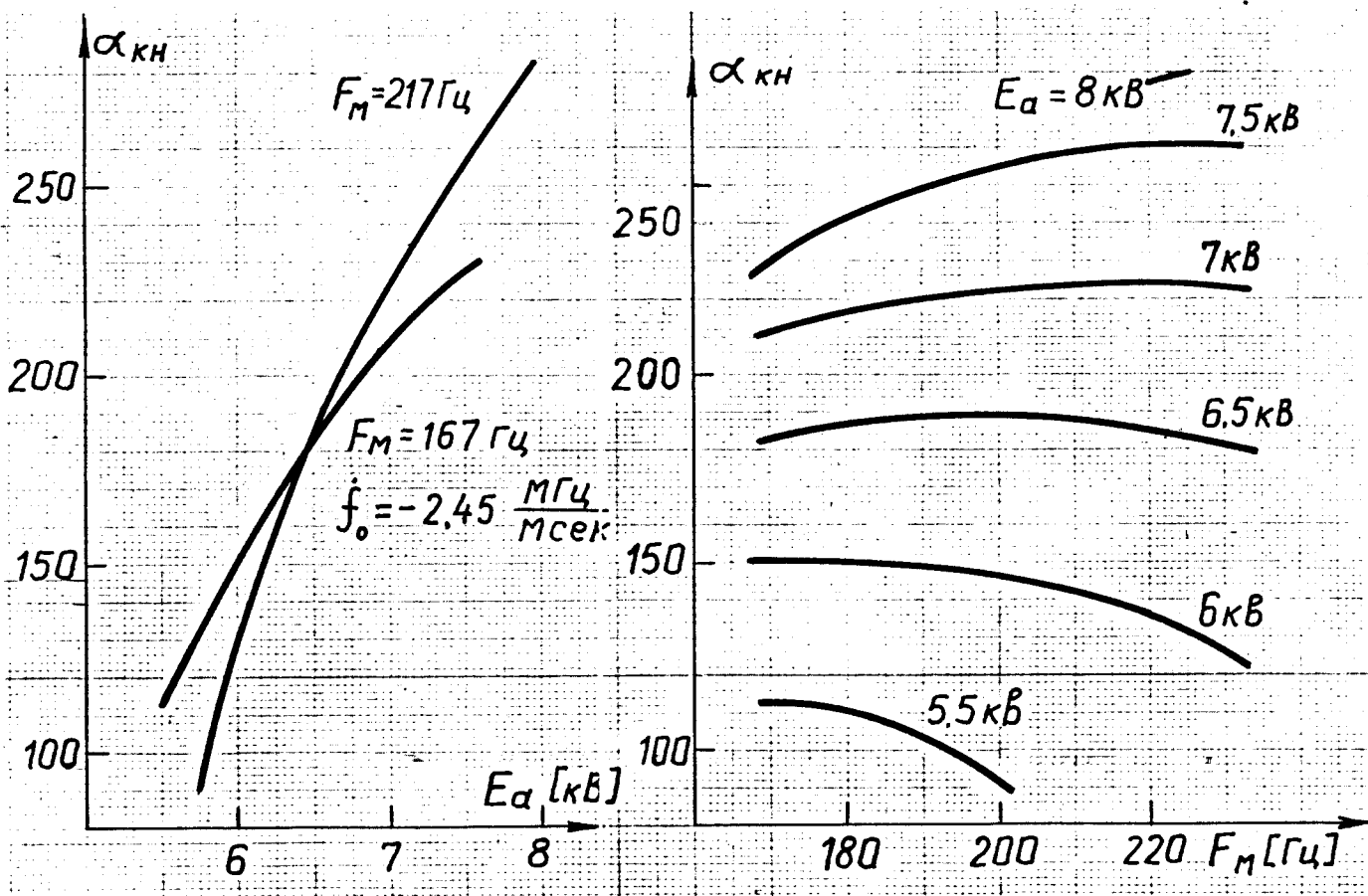


Рис. 51 . Зависимости интенсивности от E_a и F_M после ремонта ускорителя (ИЗ.12.76) при $I_{\text{осн}} = 4400 \text{ А}$, $I_{\text{под}} = 240 \text{ А}$ и $U_{\text{ф}} = -6 \text{ кВ}$.

6. Заключение

1. Использование нового вариатора частоты со специально рассчитанной формой лопаток ротора и сменных пакетов статорных пластин позволяет при увеличенном рабочем ходе сформировать частотно-временную характеристику $f(t)$, обеспечивающую ускорение протонов практически без фазовых потерь.

2. При хороших контактах элементов ротора и, соответственно, минимальных в.ч. потерях в опытном режиме при частоте модуляции $F_M = 217$ Гц и анодном напряжении $E_a = 8$ кВ напряжение на дуанте составило $U_g = 23,8$ кВ и интенсивность внутреннего пучка достигала 5 мкА.

3. Удовлетворительный срок службы подшипников ротора порядка 1-2 месяцев достигается при рабочем режиме $F_M = 167$ Гц и $E_a = 6,5-7$ кВ ($U_g = 19$ кВ) с током внутреннего пучка 3-4 мкА.

4. В процессе длительной эксплуатации увеличиваются в.ч. потери в роторе вследствие ухудшения контактов и в указанном рабочем режиме напряжение на дуанте снижается до $U_g = 16$ кВ. Коррекция фазового режима путем модификации статорных пакетов приводит в этом случае лишь к частичному уменьшению фазовых потерь и не позволяет достичь максимальной интенсивности.

5. Для стабилизации в.ч. потерь на минимальном уровне целесообразно разработать новый вариант ротора с улучшенными контактами деталей, а также использовать анодный модулятор для управления амплитудной программой ускоряющего напряжения. При этом представляется возможным увеличить ток внутреннего пучка до 4-5 мкА в эксплуатационном режиме.

6. Эксплуатация нового вариатора на протяжении более трех лет показала, что алюминиевый сплав Д16М без специального покрытия, использованный при изготовлении вариатора, обладает

устойчивостью к эрозии и необходимой электрической прочностью и поэтому он может быть рекомендован для изготовления вариатора установки "Ф".

В заключение авторы выражают благодарность Э.А.Полферову за измерение тока внутреннего пучка, П.Т.Шишлянникову за участие в измерении в.ч. характеристик и А.М.Фокиной за оформление иллюстративного материала.

КГ -
 ВМ -
 П.Т.Шишлянников
 А.М.Фокина

Дан
 Ероганов
 А.С.Савин
 М.Т.Толмачев
 Степанов -
 Канев

Литература

1. В.И.Данилов, И.Б.Енчевич, Б.И.Замолодчиков, Б.Н.Марченко, Д.Л.Новиков, Э.А.Полферов, И.И.Розанов, А.Л.Савенков, А.Н.Сафонов. Повышение интенсивности пучка протонов в шестиметровом фазотроне ОИЯИ. Атомная энергия, т.16 (1964)9.
2. В.И.Данилов, И.Б.Енчевич, Б.И.Замолодчиков, Б.Н.Марченко, Д.Л.Новиков, Э.А.Полферов, И.И.Розанов, А.Л.Савенков, А.Н.Сафонов, А.В.Шестов. Увеличение тока внутреннего пучка синхроциклотрона ОИЯИ на энергии 680 МэВ. Труды международной конференции по ускорителям в Дубне, 1963, М., Атомиздат, (1964), 591.
3. К.А.Байчер, А.В.Богомоллов, А.Т.Василенко, А.А.Глазов, В.И.Данилов, Ю.Н.Денисов, В.А.Кочкин, Б.Н.Марченко, Л.М.Онищенко. Новый вариатор синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ с увеличенным рабочим ходом. Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва, 1974, "Наука" (1975)234.
4. А.Н.Кокорев, П.Т.Шишлянников, Прибор для измерения частотной программы в.ч. системы синхроциклотрона ОИЯИ в динамическом режиме. Рацпредложение № П182-ЛЯП, удостоверение № 5183-75 от 10.10.75г. ОИЯИ, Дубна, 1975.
5. А.Н.Сафонов. Расчет допустимого роста $\cos \varphi_s$ и оценка фазовых потерь в синхроциклотроне. Депонированное сообщение ОИЯИ Б1-9 -10978, Дубна, 1977.
6. А.Н.Сафонов, Л.А.Шехтман. Исследование распределения потенциала в двумерной модели ускоряющего промежутка синхроциклотрона при наличии пространственного заряда. Препринт ОИЯИ

P9-3639, Дубна, 1967.

7. В.И.Винокуров, А.Н.Сафонов. К вопросу об оптимальной геометрии центральной области синхроциклотрона. Препринт ОИЯИ P9-4852, Дубна, 1969.
8. А.В.Честной, Б.И.Замолдчикэв, А.А.Кропин, В.П.Дмитриевский, В.И.Данилов. Исследование и корректировка магнитного поля шестиметрового синхроциклотрона. ОИЯИ БИ-1611,^{Дубна}, 1965, стр. 57-79.
9. D.Bohm and L.L.Foldy. *Phys. Rev.* 72 (1947) 649.
Теория фазотрона. Перевод в сборнике "Резонансные циклические ускорители элементарных частиц", ИИЛ Москва (1950), 49.
10. В.И.Данилов, В.Б.Мухин,^а Э.А.Полферов. Расчет системы вывода синхроциклотрона. Препринт ОИЯИ P9-4102, Дубна, 1968.
11. Т.Н.Томилина. Импульс пучка ускоренных дейтронов и эффективное время захвата. Депонированное сообщение ОИЯИ БИ-1966, Дубна, 1965.
12. А.А.Глазов, Ю.Н.Денисов, В.И.Джелепов, В.П.Дмитриевский, Б.И.Замолдчиков, Н.Л.Заплатин, В.В.Кольга, М.М.Комочков, А.А.Кропин, Л.И.Львидус, А.И.Мухин, В.С.Роганов. Сильноточный фазотрон ОИЯИ на 700 МэВ (установка "Ф"). Препринт ОИЯИ 9-3951, Дубна, 1968.

ПАРАМЕТРЫ СИНХРОЦИКЛОТРОНА О И

R (CM)	H (ЭРСТ)	DHR (Э/CM)	N	K	V/C	T (МЭВ)	E (МЭВ)
0.0	16728.8	0.00	0.000000	1.000	0.0000	0.000	938.259
5.0	16720.0	-3.32	-0.00099	2.392	0.0267	0.335	938.594
10.0	16697.0	-6.70	-0.00365	2.290	0.0533	1.336	939.595
15.0	16668.8	-5.60	-0.00594	1.792	0.0797	2.994	941.253
20.0	16644.0	-4.60	-0.00553	1.496	0.1058	5.300	943.559
25.0	16621.5	-4.20	-0.00632	1.366	0.1317	8.245	946.504
30.0	16600.5	-4.20	-0.00759	1.309	0.1573	11.821	950.080
35.0	16578.5	-4.20	-0.00887	1.269	0.1824	16.011	954.270
40.0	16557.5	-4.20	-0.01015	1.239	0.2072	20.807	959.066
45.0	16537.0	-4.39	-0.01140	1.215	0.2315	26.194	964.454
50.0	16516.0	-4.00	-0.01211	1.188	0.2553	32.156	970.415
55.0	16496.0	-3.60	-0.01200	1.157	0.2786	38.682	976.941
60.0	16478.2	-3.20	-0.01165	1.130	0.3014	45.766	984.026
70.0	16450.7	-2.70	-0.01149	1.097	0.3455	61.579	999.838
80.0	16423.6	-2.38	-0.01159	1.078	0.3873	79.433	1017.692
90.0	16405.0	-1.96	-0.01075	1.060	0.4269	99.296	1037.556
100.0	16384.4	-1.97	-0.01202	1.057	0.4641	120.955	1059.214
110.0	16365.0	-1.96	-0.01317	1.054	0.4989	144.321	1082.580
120.0	16345.0	-1.96	-0.01145	1.041	0.5313	169.246	1107.505
130.0	16332.0	-1.98	-0.00939	1.030	0.5617	195.775	1134.034
140.0	16319.6	-2.00	-0.01716	1.050	0.5899	223.694	1161.953
148.0	16288.4	-5.40	-0.014907	1.138	0.6105	246.374	1184.633
155.0	16251.5	-5.48	-0.015227	1.040	0.6273	266.483	1204.743
160.0	16224.3	-4.00	-0.013945	1.101	0.6387	281.088	1219.347
170.0	16204.0	-1.67	-0.01752	1.041	0.6610	312.050	1250.310
180.0	16184.7	-2.00	-0.02224	1.049	0.6816	343.989	1282.248
190.0	16163.5	-2.40	-0.02821	1.059	0.7006	376.716	1314.975
200.0	16137.8	-1.40	-0.01735	1.034	0.7181	410.026	1348.285
207.0	16134.5	-0.40	-0.00513	1.040	0.7299	434.417	1372.676
217.0	16119.5	-3.20	-0.014268	1.081	0.7424	462.213	1400.472
220.0	16103.1	-2.80	-0.013825	1.071	0.7497	479.445	1417.704
225.0	16092.3	-2.00	-0.012790	1.050	0.7568	497.090	1435.349
240.0	16048.4	-3.50	-0.01234	1.092	0.7763	550.188	1488.447
250.0	16012.9	-4.00	-0.016245	1.107	0.7880	585.766	1524.025
255.0	15990.0	-5.00	-0.017974	1.138	0.7935	603.374	1541.634
260.0	15966.5	-4.60	-0.017491	1.127	0.7987	621.010	1559.269
270.0	15930.8	-3.60	-0.016111	1.095	0.8088	657.187	1595.446
275.0	15906.0	-5.00	-0.018645	1.143	0.8135	674.911	1613.170
277.0	15891.5	-7.00	-0.02271	1.209	0.8152	681.701	1619.960
280.0	15860.0	-10.00	-0.017654	1.321	0.8176	691.217	1629.477

ОБОЗНАЧЕНИЯ И РАЗМЕРНОСТИ ПАРАМЕТРОВ

R (CM)	= РАДИУС ОРБИТЫ	R
H (ЭРСТ)	= НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ	H
DHR (ЭРСТ/CM)	= ПРОИЗВОДНАЯ ОТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ	D
N = (R/H) * DHR	= ПОКАЗАТЕЛЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ	N
K = 1 - N / ((1+N) * (V/C) * (V/C))	= КОЭФФИЦИЕНТ АВТОФАЗИРОВКИ	K
V/C	= ОТНОШЕНИЕ СКОРОСТИ ПРОТОНОВ К СКОРОСТИ СВЕТА	V
T (МЭВ)	= КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ ПРОТОНОВ	T
E (МЭВ) = T + E0	= ПОЛНАЯ ЭНЕРГИЯ ПРОТОНОВ	E

Я И N 36

EA=7.0КВ, FM=167ГЦ, ВЧ ХАР. ОТ 13.12.76

(МР/СЕК)	F(МГЦ)	DFT(МГЦ/МС)	U(КВ)	EV/2EU	R	COSFIR	COSFID
160.3550	25.521	-2.45	20.8	0.010	0		
160.2134	25.499	-2.60	20.5	0.255	5	0.150	
159.8226	25.437	-2.80	20.3	0.494	10	0.089	
159.2717	25.349	-3.20	20.1	0.652	15	0.099	
158.6461	25.249	-3.55	20.0	0.736	20	0.119	0.114
157.9385	25.137	-3.90	19.8	0.797	25	0.135	0.160
157.1453	25.010	-4.15	19.8	0.830	30	0.146	0.181
156.2479	24.868	-4.60	20.0	0.860	35	0.163	0.202
155.2697	24.712	-5.00	20.1	0.885	40	0.178	0.223
154.2112	24.543	-5.30	20.1	0.900	45	0.193	0.230
153.0692	24.362	-5.60	20.1	0.915	50	0.210	0.244
151.8625	24.170	-5.85	19.8	0.927	55	0.230	0.251
150.6066	23.970	-6.00	19.4	0.935	60	0.251	0.269
147.9773	23.551	-6.10	18.5	0.950	70	0.285	0.277
145.1418	23.100	-6.05	17.7	0.953	80	0.317	0.286
142.2019	22.632	-5.85	17.7	0.962	90	0.328	0.303
139.1193	22.142	-5.50	18.1	0.968	100	0.321	0.330
135.9555	21.638	-5.10	18.1	0.972	110	0.318	0.340
132.7332	21.125	-4.75	18.3	0.975	120	0.317	0.369
129.5251	20.615	-4.50	17.3	0.980	130	0.344	0.378
126.3169	20.104	-4.15	17.2	0.985	140	0.335	0.387
123.6617	19.681	-3.90	17.2	0.988	148	0.308	0.378
121.3220	19.309	-3.75	18.1	0.990	155	0.297	0.405
119.6683	19.046	-3.60	18.0	0.995	160	0.307	0.415
116.5588	18.551	-3.30	17.5	0.998	170	0.330	0.435
113.5202	18.067	-3.10	18.0	0.999	180	0.323	0.456
110.5499	17.595	-3.10	18.0	1.000	190	0.345	0.478
107.6473	17.133	-3.05	17.9	1.000	200	0.378	0.489
105.7129	16.825	-2.90	18.2	1.000	207	0.383	0.510
103.5184	16.475	-2.80	18.5	1.000	215	0.361	0.510
102.1561	16.259	-2.56	18.6	1.000	220	0.345	0.520
100.8326	16.048	-2.40	18.9	1.000	225	0.337	0.530
96.9703	15.433	-2.00	17.5	1.000	240	0.327	0.530
94.4971	15.040	-1.70	16.6	1.000	250	0.312	0.530
93.2841	14.847	-1.45	18.5	1.000	255	0.241	0.552
92.0936	14.657	-1.20	20.4	1.000	260	0.189	0.575
89.8040	14.293	-0.70	19.5	1.000	270	0.128	0.575
88.6791	14.114	-0.40	19.7	1.000	275	0.072	0.575
88.2269	14.042	-0.20	19.3	1.000	277	0.035	0.575
87.5378	13.932	0.00	19.0	1.000	280	0.000	0.563

(МГЦ) - ЧАСТОТА ОБРАЩЕНИЯ ПРОТОНОВ
 (МЕГАРАД/СЕК) = $2\pi \cdot F$ - КРУГОВАЯ ЧАСТОТА ОБРАЩЕНИЯ ПРОТОНОВ
 FT(МГЦ/МСЕК) - ПРОИЗВОДНАЯ ОТ ЧАСТОТНОЙ КРИВОЙ ПО ВРЕМЕНИ
 (КВ) - УСКОРЯЮЩЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ
 V/2EU - ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ РАБОТ ЭНЕРГИИ ПРОТОНАМИ ЗА ОБОРОТ
 OSFIR = $E \cdot DFT / (2U \cdot (EV/2EU) \cdot K \cdot F \cdot F)$ - КОСИНУС РАВНОВЕСНОЙ ФАЗЫ
 OSFID - НАИБОЛЬШИЙ ДОПУСТИМЫЙ КОСИНУС РАВНОВЕСНОЙ ФАЗЫ
 G = 938,2592 МЭВ - ЭНЕРГИЯ ПОКОЯ ПРОТОНОВ

ОСТАВИЛ САФОНОВ А.Н.

ДУБНА 1973