

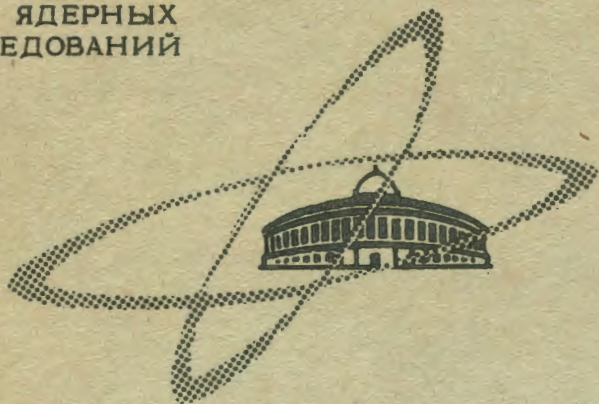
E-645

4/vii-68

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P9 - 3805



И.Б.Енчевич, Т.Н.Томилина

УМЕНЬШЕНИЕ ФАЗОВЫХ ПОТЕРЬ
В СИНХРОЦИКЛОТРОНЕ НА 680 МЭВ
ПРИ ПОМОЩИ КОРРЕКЦИИ АМПЛИТУДЫ
УСКОРЯЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1968

P9 - 3805

И.Б.Енчевич, Т.Н.Томилина

**УМЕНЬШЕНИЕ ФАЗОВЫХ ПОТЕРЬ
В СИНХРОЦИКЛОТРОНЕ НА 680 МЭВ
ПРИ ПОМОЩИ КОРРЕКЦИИ АМПЛИТУДЫ
УСКОРЯЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ**

Направлено на депонирование в АЭ

73/6/2 мф



В в е д е н и е

Для уменьшения фазовых потерь в синхротронном циклотроне необходимо адиабатическое изменение параметров, определяющих фазовую устойчивость.

В реальном ускорителе в.ч. генератор и резонансная система, включающая ускоряющий электрод, настраиваются таким образом, чтобы обеспечить диапазон частот, требуемый для получения частиц заданной энергии. При этом закон изменения амплитуды ускоряющего напряжения от частоты для автоколебательной системы, работающей в широком диапазоне частот, получается не всегда равномерным.

Как правило, в диапазоне рабочих частот автогенератора имеются частоты, на которых амплитуда резко уменьшается, что создает увеличение фазовых потерь частиц в процессе ускорения.

Резкое уменьшение амплитуды ускоряющего напряжения, которое видно на осциллограмме (см. рис. 1), определяется наличием в резонансной системе паразитных контуров, отсасывающих на ряде частот энергию генератора. Загрузка пучком увеличивает глубину провалов. Избавиться от паразитных контуров не всегда возможно, так как они обусловлены, в основном, конструктивными особенностями резонансной системы в целом.

Если на этих частотах увеличить возбуждение генератора по сеточной цепи, то амплитуда напряжения на дуанте увеличится, а фазовые потери уменьшатся.

1. Изменение интенсивности, связанное с изменением области фазовой устойчивости

Интенсивность пучка в синхроциклотроне определяется частицами, находящимися внутри устойчивой области^{/1/}. Границей замкнутых траекторий, определяющих устойчивое движение частиц на фазовой плоскости ϕ , $\dot{\phi}$ является сепаратриса, а полная площадь, заключенная внутри сепаратрисы, прямо пропорциональна числу ускоряемых частиц.

Для того чтобы уменьшение амплитуды ускоряющего напряжения сказалось на уменьшении интенсивности длительность участка, характеристики с пониженной амплитудой должны превосходить период фазовых колебаний.

В синхроциклотроне ОИЯИ на 680 МэВ период одного фазового колебания лежит в пределах 10–15 мксек (при частоте модуляции $F_M \approx 110$ Гц)^{/2/}. Длительность провалов в амплитудной характеристике – 120 мксек на частоте 18,5 МГц и 300 мксек – на частоте 15,5 МГц.

Для оценки влияния на интенсивность медленного изменения амплитуды ускоряющего напряжения (в сравнении с периодом фазового колебания) следует определить изменения равновесной фазы ϕ_s , вызванные изменением амплитуды^{/3/}:

$$\sin \phi_s = - \frac{2 \pi E_s}{e V K \omega_s^2} \cdot \frac{d \omega_s}{dt} \quad (1)$$

Для некоторого фиксированного радиуса значения величин E_s , ω_s , K и $\frac{d \omega_s}{dt}$ останутся неизменными при изменении V – амплитуды ускоряющего напряжения.

На рис. 2 представлен график изменения площадей, заключенных внутри сепаратрис на фазовой плоскости для различных $\cos \phi_s^{(1)}$. Из графика видно, что уменьшение ϕ_s приводит к уменьшению площади внутри сепаратрисы и к уменьшению интенсивности. График рассчитан в предположении, что частицы равномерно заполняют область фазовой устойчивости.

По формуле (1) можно определить, что увеличение амплитуды ускоряющего напряжения на 5% приводит к увеличению ϕ_s примерно на 3° , что может вызвать увеличение интенсивности на 12 + 18 % (для $\phi_s = 120 - 150^\circ$).

Следует иметь в виду, что при такой оценке не было учтено влияния затухания амплитуд фазовых колебаний, которое допускает некоторый рост $\sin \phi_s$ без потерь интенсивности.

2. Возможный механизм локального уменьшения амплитуды в.ч. напряжения в диапазоне рабочих частот

Нагрузка автогенератора (рис. 3) состоит из вариатора, резонансной линии, дунта^{/4/} (Z_1) и конструктивных элементов в виде последовательного контура (Z_2), включенного параллельно основному контуру (Z_1).

Если система контуров (Z_1, Z_2), изображенная на рис. 3, питается током $i = I \sin \omega t$, то амплитудное значение тока (I) будет изменяться по закону^{/5/}

$$I = I_0 \frac{1}{\left[\left(1 + \frac{L_1}{r R C_1} \right)^2 + \frac{L_1}{R^2 C_1} \right]^{1/2}} e^{-j \arctg \frac{r C_1}{L_1 + r R C_1} \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}} \quad (2)$$

где $I_0 = \text{const}$, т.е. будет иметь место амплитудная модуляция.

Так как генератор ускоряющего напряжения работает в диапазоне частот, то дополнительная нагрузка в виде последовательного контура Z_2 будет влиять на работу основного контура Z_1 только в районе собственной частоты контура Z_2 . Ширина и глубина провалов в амплитудно-частотной характеристике будут определяться добротностью контура Z_2 .

Другой механизм появления неравномерности в амплитудной характеристике - возникновение биений из-за одновременного выполнения условия самовозбуждения $S_{Roe} k \geq 1$ как для основного, так и для одного из паразитных контуров; в этом случае амплитуда и фаза суммарных колебаний модулируются с частотой, соответствующей разности частот основного и паразитного контуров по закону:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_1^2 + 2 A_1 A_1 \cos [a \sin (2 \pi F_M t + \frac{\pi}{2})] t} ; \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{A_1 \sin [a \sin (2 \pi F_M t + \frac{\pi}{2})] t}{A_1 \cos [a \sin (2 \pi F_M t + \frac{\pi}{2})] t + A_1} ; \quad (4)$$

где $A_1 \sin [\omega + a \sin (2 \pi F_M t + \frac{\pi}{2})] t$ - амплитуда и частота основного контура, $A_1 \sin \omega t$ - амплитуда и частота паразитного контура.

Коэффициент "а" определяется параметрами контура; F_M - частота модуляции в.ч. автогенератора.

Таким образом, амплитуда и фаза суммарных колебаний модулируются с частотой, соответствующей разности частот $a \sin (2 \pi F_M t + \frac{\pi}{2})$, и если одна из частот является функцией времени, то модуляция фазы и амплитуды зависит от времени.

3. Импульсный сеточный модулятор для коррекции амплитуды в.ч. генератора

Для того чтобы компенсировать уменьшение амплитуды ускоряющего напряжения на частотах 18,5 и 15,5 Мгц, что соответствует временным задержкам от начала цикла ускорения на 2,0 и 3,1 мсек (при частоте модуляции $F_M = 109$ гц), на сетку в.ч. генератора подавались импульсы положительной полярности.

Блок-схема управления в.ч. генератором с коррекцией амплитуды изображена на рис. 4. Часть блок-схемы, обведенная пунктиром, представляет собой импульсный модулятор для коррекции амплитуды^{х/}.

Принципиальная схема блока формирования длительности импульсов изображена на рис. 5.

На вход блока поступают задержанные во времени импульсы положительной полярности. Два канала на лампах 1/2 Л₂, Л₃ и 1/2 Л₂, Л₄ позволяют осуществлять отдельную регулировку длительности импульсов коррекции от 100 мксек до 2 мсек.

Принципиальная схема каскадов предварительного усиления и выходных каскадов изображена на рис. 6.

На вход каскадов предварительного усиления на лампах ГУ-50 поступают импульсы положительной полярности с регулируемой длительностью. Эти импульсы усиливаются и подаются на сетки ламп оконечного каскада, представляющего собой две лампы ГУ-80, соединенные параллельно. Нагрузкой оконечного каскада служит сопротивление $R_H = 1200$ ом, с которого положительные импульсы поступают через переходную емкость на часть сопротивления (140 ом) гридлика в.ч. генератора. Оконечный каскад питается от выпрямителя А 622 - 84 (10 кв).

Регулировка амплитуды импульсов коррекции осуществлялась изменением напряжения питания выходных каскадов.

На рис. 7 изображена диаграмма импульсов сеточного модулятора.

4. Результаты эксперимента

Схема управления положением импульсов коррекции работает таким образом, что эти импульсы можно передвигать по всему периоду модуляции. Размещение корректирующих амплитуду импульсов ни на частоте захвата, ни на частоте вывода протонов, ни на частотах, соответствующих уменьшениям амплитуды (кроме частот 18,5 и 15,5 Мгц), не дало никаких

^{х/} Принципиальная схема блока временной задержки дана в работе^{16/}.

изменений интенсивности. Только в случае, когда задержка первого импульса коррекции относительно начала цикла ускорения составляла $2,0 \text{ мсек} \pm 50 \text{ мксек}$, а второго — $3,1 \text{ мсек} \pm 50 \text{ мксек}$ было получено максимальное увеличение интенсивности.

Длительность импульсов коррекции также подбиралась экспериментально и оказалась равной для первого импульса $140 \text{ мксек} \pm 20 \text{ мксек}$, для второго — $300 \text{ мксек} \pm 20 \text{ мксек}$.

Для выбора оптимальной амплитуды импульсов коррекции была снята зависимость интенсивности пучка нейтронов от напряжения питания выходного каскада импульсного модулятора, график которой $a_n = f(E_{ам})$ приведен на рис. 8. Из графика видно, что максимальная интенсивность пучка нейтронов получается при напряжении питания модулятора $800 \text{ в} \pm 50 \text{ в}$. Фотография осциллограммы формы импульса коррекции на сетке в.ч. генератора приведена на рис. 9.

Зависимость амплитуды ускоряющего напряжения от времени при подаче импульсов коррекции на сетку в.ч. генератора и без них представлена на графике (см. рис. 10). Из графика видно, что в результате подачи на сетку в.ч. генератора импульсов коррекции относительное увеличение амплитуды ускоряющего напряжения на частотах 18,5 и 15,5 Мгц составляет 5%.

Увеличение интенсивности в результате коррекции амплитуды по данным экспериментаторов, работающих на вторичных пучках, получается порядка 18%, что соответствует току циркулирующего пучка $2,5 + 2,8 \text{ мка}$ вместо $2,1 - 2,3 \text{ мка}$ без коррекции амплитуды. Интенсивность введенных протонов при этом возрастает пропорционально.

По показаниям ионизационного дозиметра на пульте управления синхроциклотрона при работе с коррекцией амплитуды интенсивность возрастает на $12 + 18\%$.

На рис. 11 а,б показаны осциллограммы ускоряющего напряжения при включенной схеме амплитудной коррекции (а) и в обычном режиме без коррекции (б).

На рис. 12 а,б показана форма импульса пучка ускоренных частиц с разных датчиков (вверху и внизу осциллограммы) с коррекцией амплитуды ускоряющего напряжения (а) и без коррекции (б). Из осциллограмм

видно, что ширина импульса на нулевом уровне остается неизменной, но при амплитудной коррекции форма основного импульса ближе к колоколообразной и площадь, ограниченная импульсом пучка и горизонтальной прямой, несколько больше.

5. Мощность потерь при коррекции амплитуды

Существовали опасения, что вся дополнительная мощность, получаемая в.ч. генератором при работе схемы амплитудной коррекции, выделится в конструктивных элементах, в частности, в опорных пружинах. Была сделана оценка дополнительной мощности, получаемой автогенератором при работе сеточного модулятора: $P_1 = I_{к1} E_a = 7,4 \cdot 7 \cdot 10^3 = 51,80 \text{ кВт}$ — мощность без коррекции, $P_2 = I_{к2} E_a = 7,45 \cdot 7 \cdot 10^3 = 52,15 \text{ кВт}$ — мощность с коррекцией, $\Delta P = P_2 - P_1 = 52,15 - 51,80 = 0,35 \text{ кВт}$.

Если считать, что КПД в.ч. генератора составляет 50%, то дополнительные потери мощности при коррекции амплитуды составляют $0,5 \cdot 0,35 = 0,175 \text{ кВт}$.

Вода, охлаждающая пружины, протекает через них со скоростью 3 л/мин. Если пренебречь потерями на излучение и считать справедливыми первоначальные опасения, то дополнительная энергия от коррекции амплитуды выделит количество тепла, равное

$$Q = 0,24 \Delta P t = 0,24 \cdot 0,175 \cdot 60 = 2,52 \text{ ккал,}$$

которое нагревает воду, протекающую через пружины на $2,52:3 = 0,84^\circ \text{C}$.

При измерении температуры воды, выходящей после охлаждения пружин, не обнаружено разницы в температуре воды в зависимости от включения или отключения схемы коррекции амплитуды. Проверка показала, что сделанное предположение несправедливо, и дополнительные потери мощности распределяются более равномерно по узлам в.ч. системы ускорителя.

З а к л ю ч е н и е

1. Проведенный эксперимент подтвердил предположение о наличии фазовых потерь на частотах 18,5 и 15,5 Мгц.

2. Коррекция амплитуды на этих частотах на 5% увеличила интенсивность на 12 - 18% и снизила фоновое излучение.

3. Увеличение амплитуды ускоряющего напряжения в районе частот захвата и других частотах, кроме отмеченных, не приводило к увеличению интенсивности.

4. Амплитудная зависимость ускоряющего напряжения от времени при данных параметрах ускорителя, по-видимому, не является оптимальной даже после применения схемы коррекции.

5. Незначительное увеличение мощности, потребляемой в.ч. генератором, и проведенные измерения температуры охлаждающей воды дают основания считать, что применение схемы амплитудной коррекции не снизит эксплуатационной надежности ускорителя.

6. Амплитудная коррекция может быть осуществлена не только подачей импульсов напряжения положительной полярности на сетку генератора, но также синхронной регулировкой положительной обратной связи на определенных частотах или другими методами.

Монтаж и наладка схем амплитудной коррекции производились старшим техником В.И.Ивановым, который принимал активное участие во всех измерениях.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность В.И.Данилову и Е.И.Розанову за проявленный интерес к работе.

Л и т е р а т у р а

1. А.А.Коломенский, А.Н.Лебедев. Теория циклических ускорителей, ГИЗ физ.-мат. литературы Москва, 1962.
2. В.И.Данилов, И.В.Пузынин, А.Н.Сафонов, Б.Ф.Феоктистов. Препринт ОИЯИ Р-2912, Дубна 1966 г.
3. D.Bohm and L.L.Foldy, Phys. Rev., 72, 649, 1947.

4. А.Л.Минц, И.Х.Невяжский, Е.И.Поляков. Радиотехника и электроника № 7, 1956 г.

5. С.И.Евтянов. Радиопередающие устройства ГИЗ литературы по вопросам связи и радио, Москва, 1950.г.

6. И.Б.Енчевич, В.И.Иванов, Т.Н.Томплина. Препринт ОИЯИ Б1-2810, Дубна 1966.

Рукопись поступила в издательский отдел
11 апреля 1968 года.

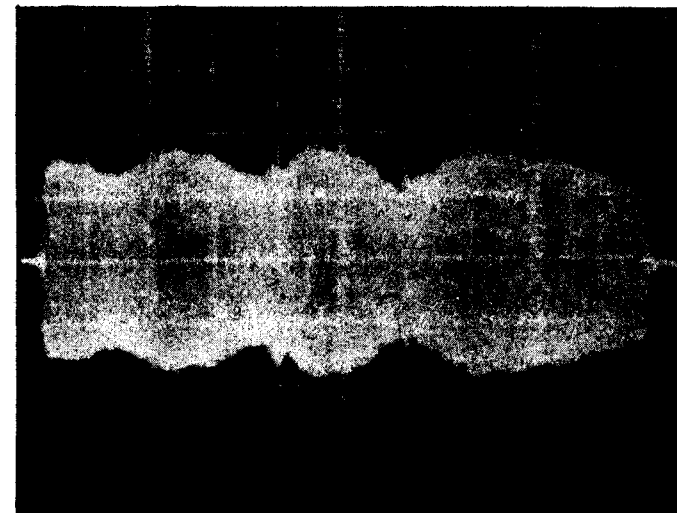


Рис. 1. Осциллограмма в.ч. напряжения на ускоряющем электроде синхроциклотрона на 680 Мэв. Развертка 400 мксек/см.

$S \frac{eV_s}{2\pi q K \omega^2}$ $-\frac{1}{2}$

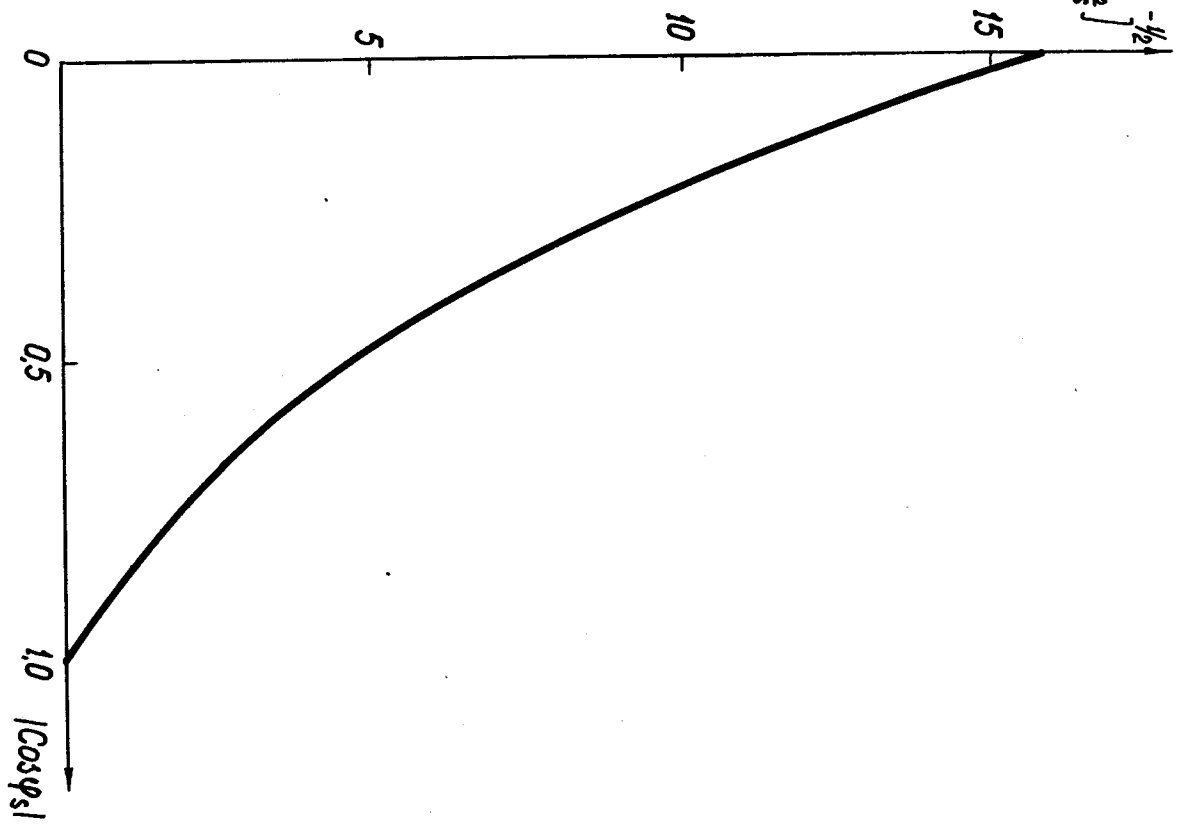


Рис. 2. Площадь области устойчивости, заключенная внутри сепаратрисы в зависимости от $\cos \varphi_s$.

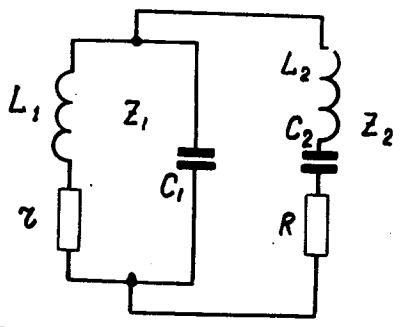


Рис. 3. Схема нагрузки в.ч. автогенератора. Z_1 - эквивалентное сопротивление основного контура L_1, C_1, r ; Z_2 - эквивалентное сопротивление паразитного контура L_2, C_2, R .

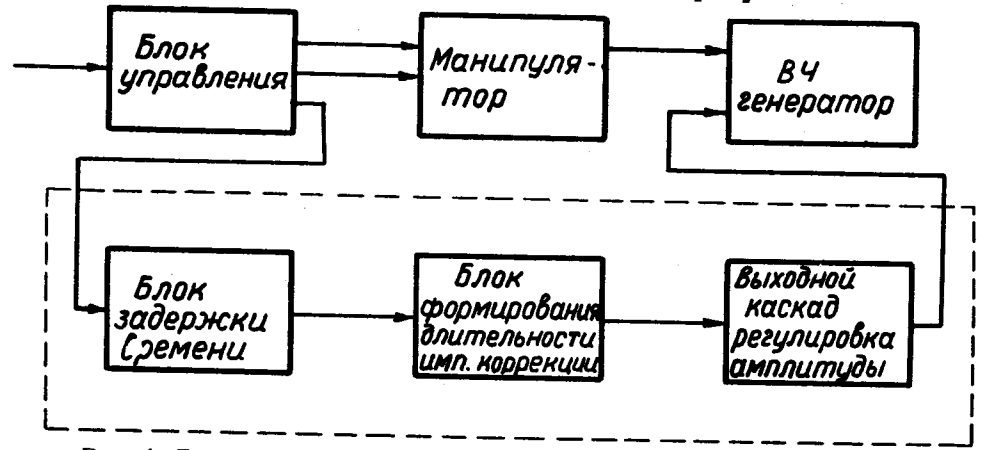


Рис. 4. Блок-схема управления в.ч. генератором. Пунктиром обведен импульсный модулятор для коррекции амплитуды.

Первый канал.

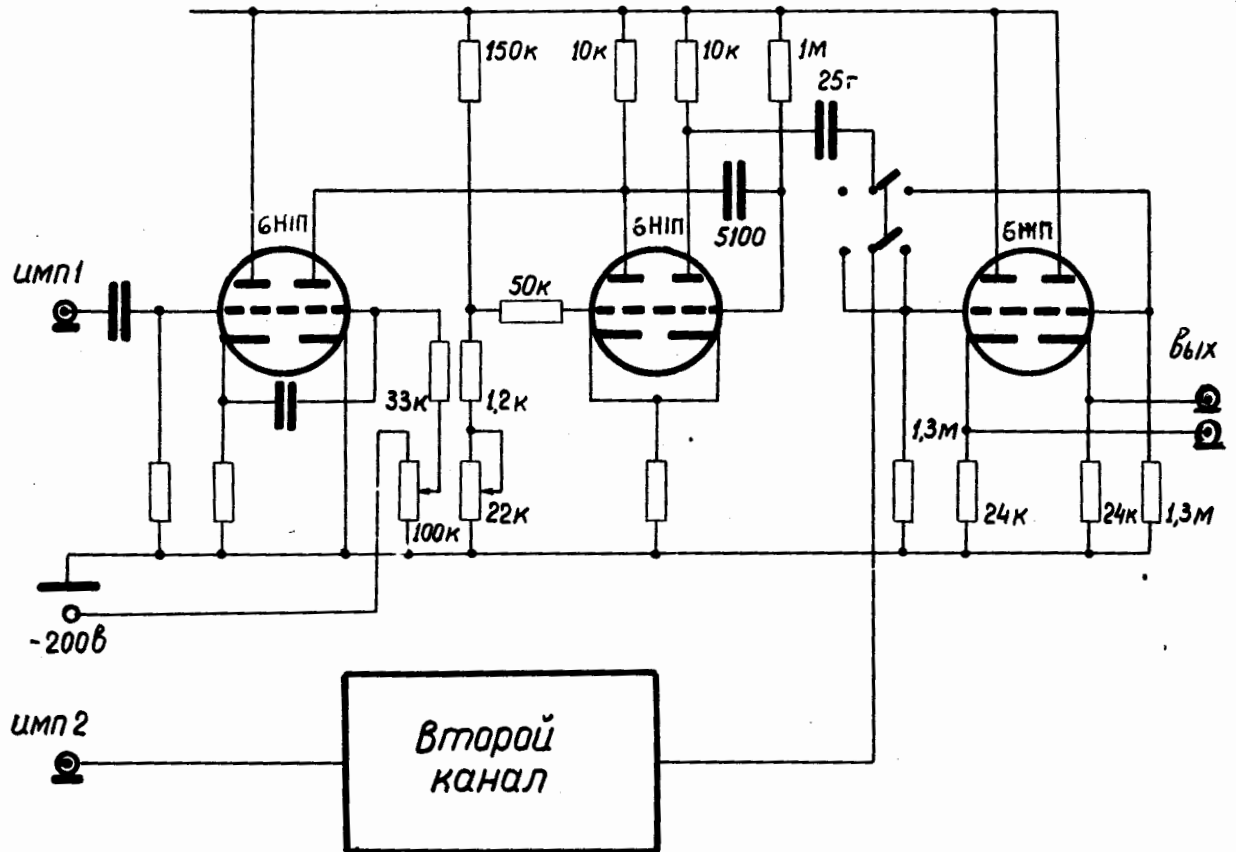


Рис. 5. Схема регулировки длительности импульсов коррекции.

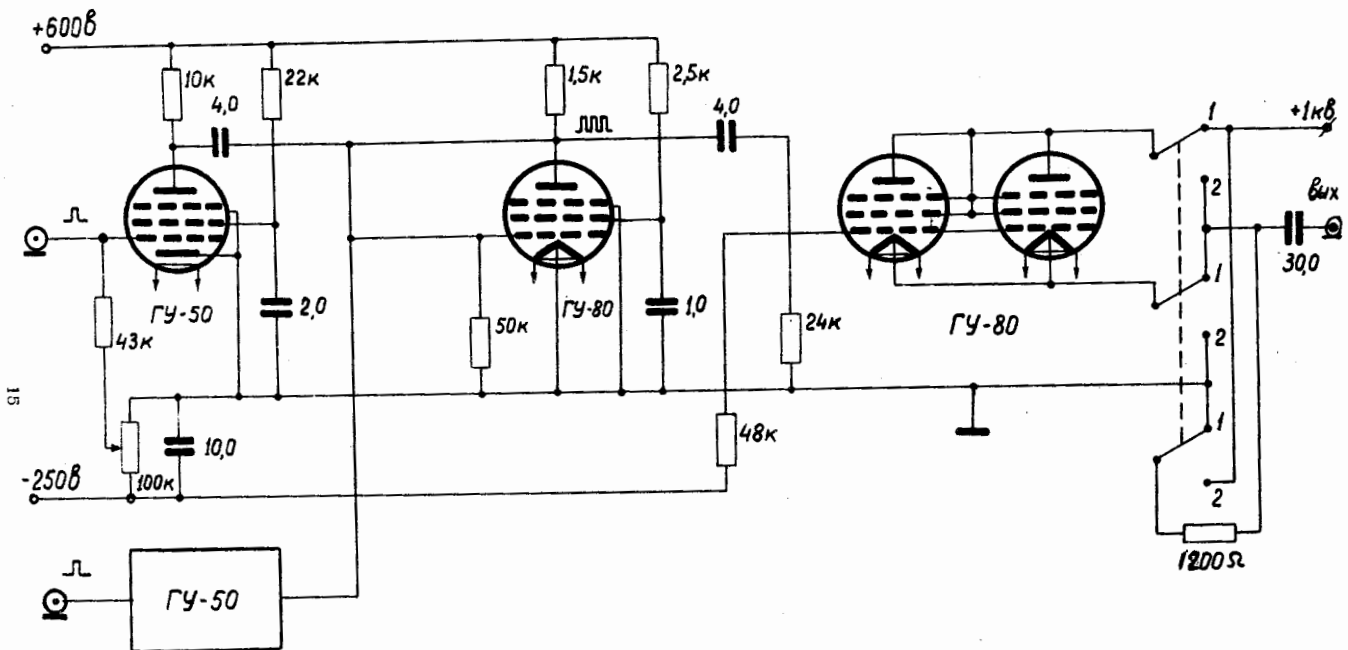


Рис. 6. Выходные каскады сеточного модулятора.

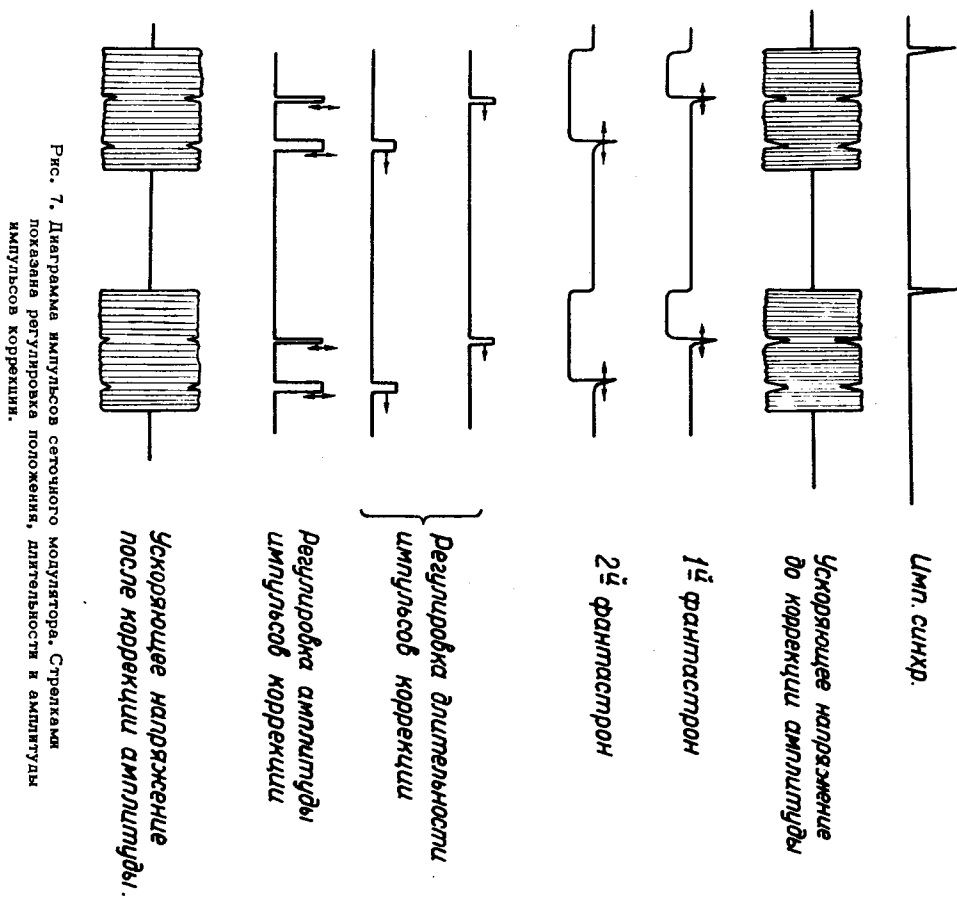


Рис. 7. Диаграмма импульсов сеточного модулятора. Стрелками показана регулировка положения, длительности и амплитуды импульсов коррекции.

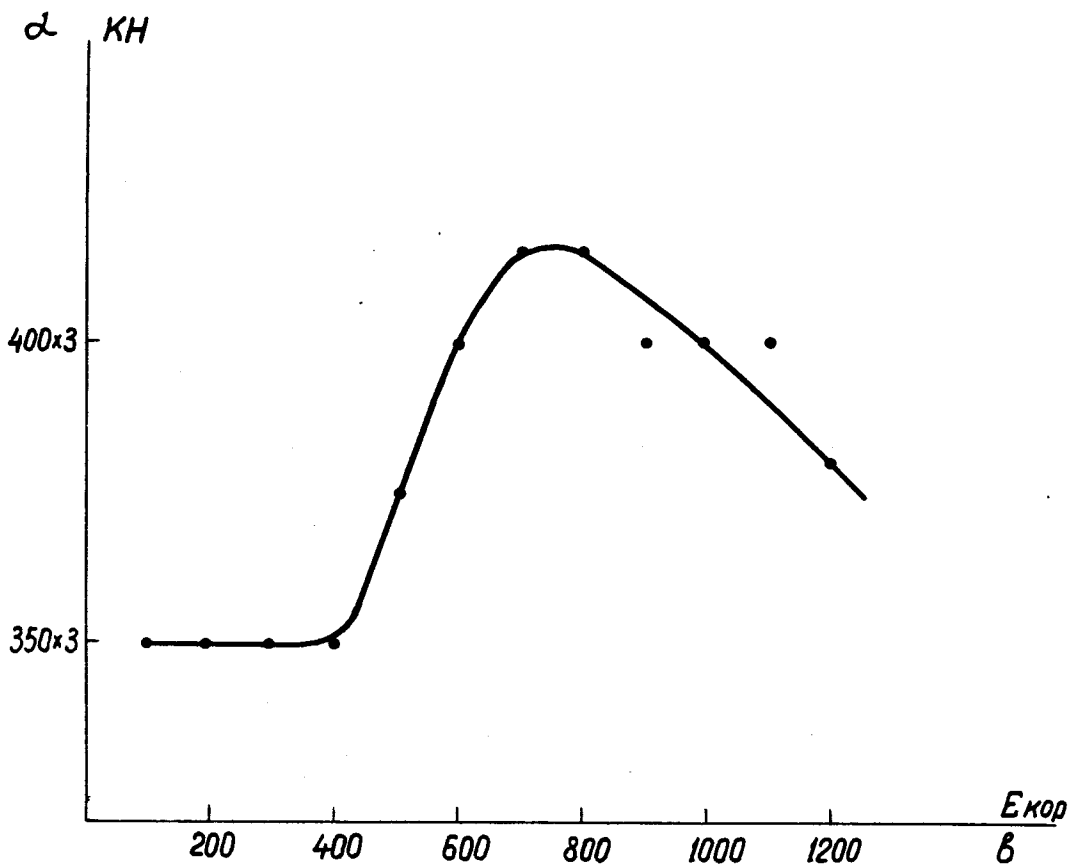


Рис. 8. График зависимости интенсивности ускорителя от амплитуды импульсов коррекции.

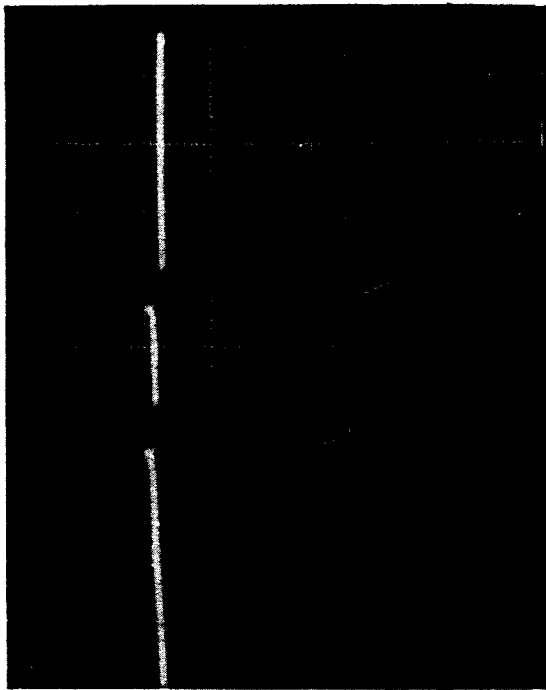


Рис. 9. Осциллограмма импульсов коррекции на сетке в.ч. генератора.

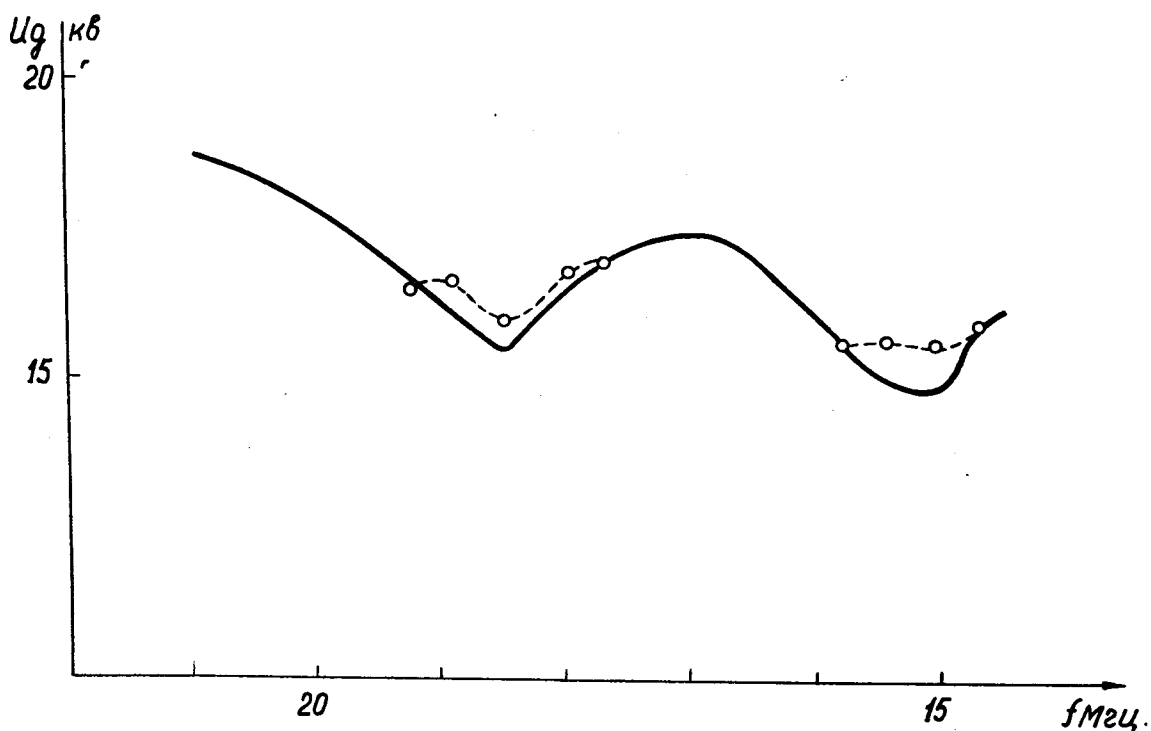
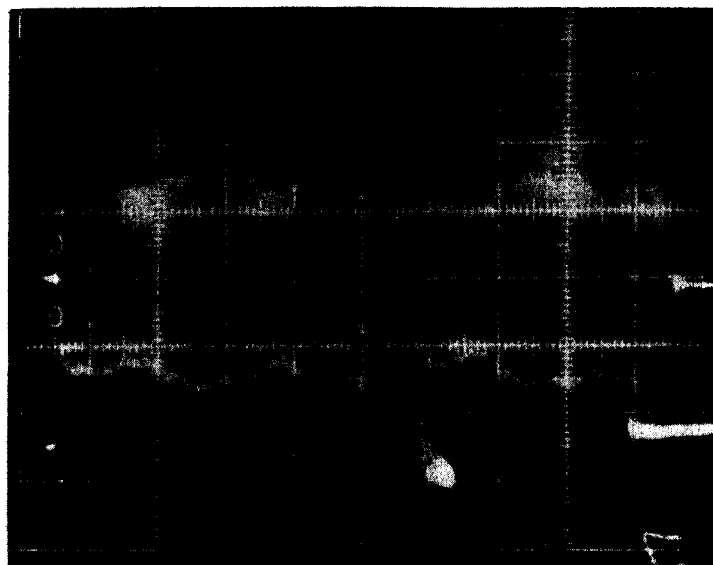


Рис. 10. Зависимость амплитуды ускоряющего напряжения от частоты. Сплошная линия - без коррекции амплитуды; пунктирная линия - с коррекцией амплитуды.

a)



б)

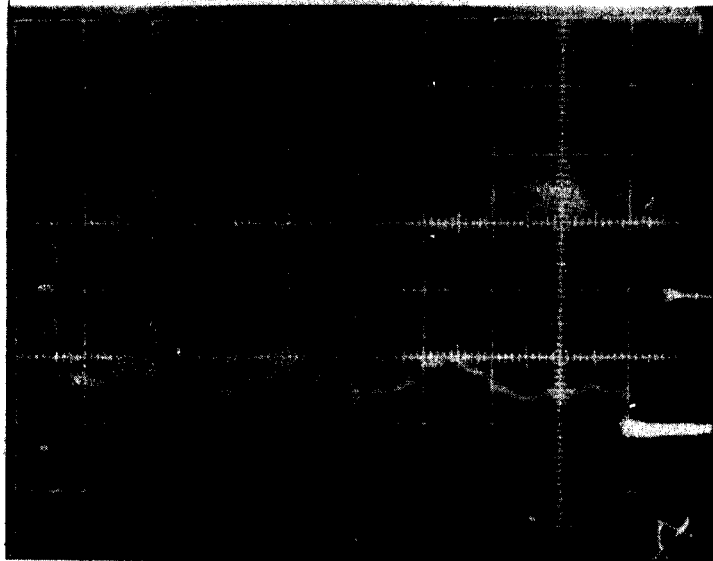
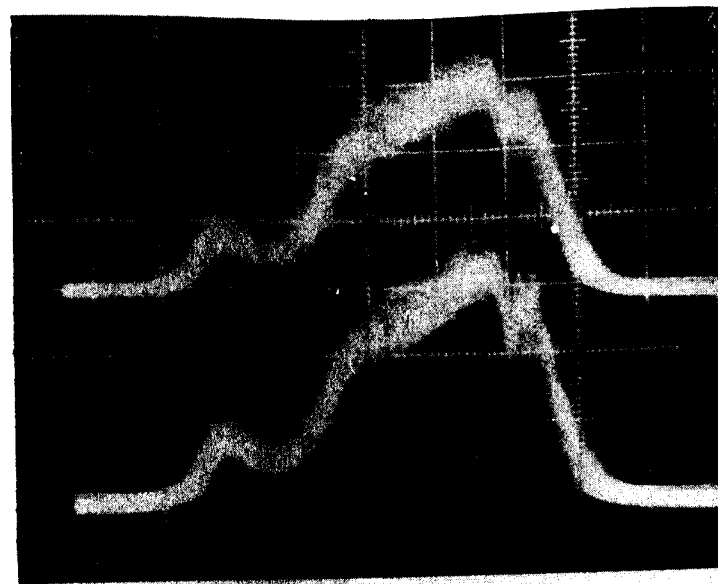


Рис. 11. Осциллограммы ускоряющего в.ч. напряжения при включенном сеточном модуляторе для амплитудной коррекции (а); при отключенном модуляторе (б). Развертка 400 мксек/см.

a)



б)

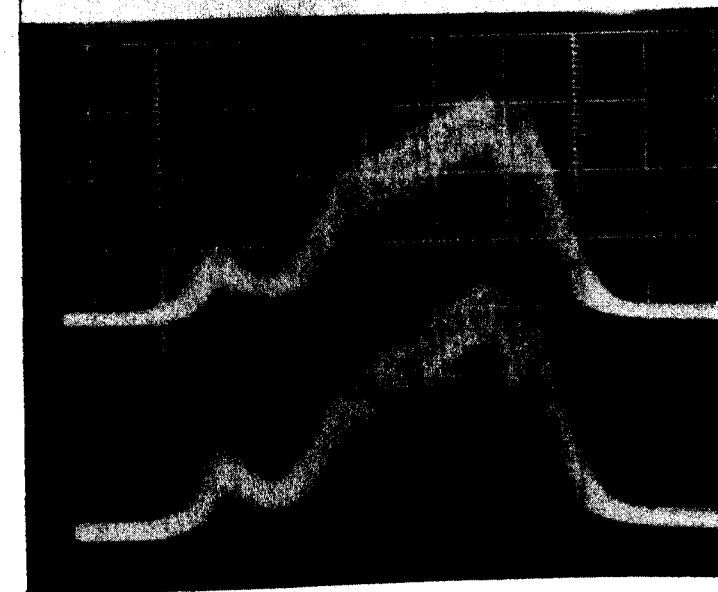


Рис. 12. Осциллограммы огибающей импульсов ускоренных частиц с двух датчиков: с коррекцией амплитуды ускоряющего напряжения (а) и без коррекции (б). Развертка 200 мксек/см.