

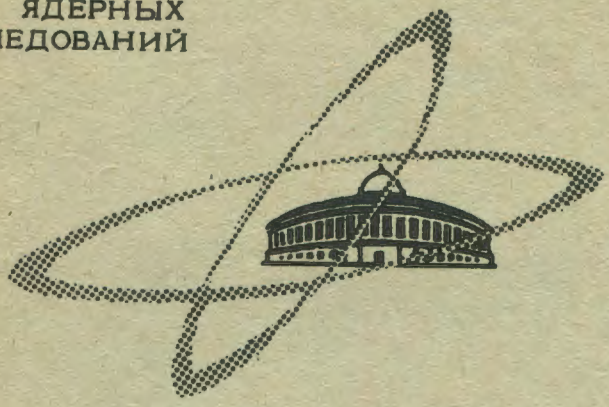
E-645

9/1

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P9 - 3969



И.Б.Енчевич, Т.Н.Томилина

ИЗМЕРЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ
АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ
СИНХРОЦИКЛОТРОНА НА 680 МЭВ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

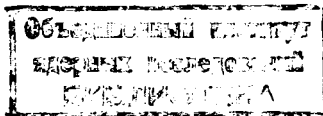
1968

Р9 - 3969

И.Б.Енчевич, Т.Н.Томилина

ИЗМЕРЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ
АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ
СИНХРОЦИКЛОТРОНА НА 680 МЭВ

Направлено в АЭ



4419/2 чр.

В в е д е н и е

Для создания в синхроциклотроне такого режима ускорения заряженных частиц, в котором фазовые потери были бы минимальны, необходимо, при прочих равных условиях, чтобы амплитудно-частотная характеристика в.ч. системы была оптимальной. Это значит, что при минимальной потребляемой мощности нужно получить такую амплитуду ускоряющего напряжения, которая обеспечивает максимальную интенсивность пучка частиц конечной энергии.

Известно несколько способов для определения оптимальных характеристик:

1. Расчётные способы, основанные на теории Бома и Фолди^{/1/}.
2. Экспериментальный подбор ширины щели между ускоряющими электродами^{/2/}.
3. Экспериментальный подбор зависимости частоты от времени при заданной амплитудной характеристике.

Однако расчёты, произведенные непосредственно по Бому и Фолди, дают значительные расхождения с экспериментом. Рассчитанный и построенный в CERN'е ^{/3/} модулятор, меняющий анодное напряжение в.ч. генератора по линейному закону, привел к повышению интенсивности, но нет оснований считать эту форму модуляционной кривой оптимальной. Внесение не-

которых поправок в теорию Бома и Фолди при определении косинуса равновесной фазы, хотя и снижает неточность допущения о шелевом наборе энергии, не может учесть всю сложность процесса ускорения, и особенно - захвата^{/4/}.

Экспериментальный подбор ширины ускоряющей щели затруднен не только из-за наличия ряда конструктивных узлов в районе щели (ионный источник, фокусирующие электроды и т.п.), но и вследствие остаточной радиационной активности, сильно ограничивающей возможность проведения монтажных работ.

Применение вспомогательных электродов для изменения набора энергии за оборот на захвате^{/5/} (эквивалентно подбору ширины ускоряющей щели) затруднено теми же причинами, а также взаимным влиянием двух связанных резонансных систем.

Третий способ сводится к варьированию формы пластин модулирующей емкости для получения большей интенсивности^{/6,7/} или к одновременному изменению частоты модуляции и величины постоянного анодного напряжения в.ч. генератора синхроциклотрона^{/8/}. Конструкция вариатора (с одной стороны, требуемая минимальная емкость и, с другой, допустимая максимальная скорость вращения) ограничивает получение оптимальной характеристики частота-время, а чрезмерный рост ускоряющего напряжения по всему диапазону рабочих частот приводит к перегреву вариатора и других узлов ускорителя и возникновению пробоев.

Экспериментальный подбор оптимальной характеристики, связанный с конструктивными изменениями, всегда очень трудоемок и требует нарушения вакуума в разгонной камере.

В работе предлагается способ определения оптимальной амплитудно-частотной характеристики в.ч. системы синхроциклотрона без нарушения вакуума. Характеристика снимается на действующем ускорителе, поэтому автоматически учитываются все факторы, которые влияют на его работу.

1. Обоснование метода

Увеличение интенсивности синхроциклотрона на 680 Мэв после коррекции амплитудной характеристики^{/9/} свидетельствует о том, что только на частотах 18,5 и 15 Мгц локальное увеличение амплитуды ускоряющего на-

пряжения приводит к росту интенсивности. На основании этого экспериментального результата можно ожидать, что некоторое уменьшение амплитуды на других частотах диапазона не приведет к уменьшению интенсивности.

Для снятия оптимальной амплитудно-частотной характеристики (максимальная интенсивность при минимальной потребляемой мощности для заданных параметров ускорителя) на сетку в.ч. генератора через фиксированные отрезки времени подается импульс отрицательной полярности. Амплитуда импульса регулируется в достаточных пределах для того, чтобы образующийся при этом провал в амплитуде ускоряющего напряжения мог уменьшить интенсивность пучка на конечном радиусе.

Оптимальным значением амплитуды на данной частоте можно считать такую минимальную амплитуду, при которой сохраняется полная интенсивность (при постоянных параметрах ускорителя в течение всего времени измерений).

Измерения оптимальной амплитуды производились дискретно от точки к точке через определенные интервалы времени. В в.ч. системе с вращающимся ротором вариатора частота и время связаны функциональной зависимостью.

Сравнение снятой таким методом амплитудно-частотной характеристики с реально существующей позволяет определить, на каких частотах амплитуда ускоряющего напряжения может быть уменьшена без ущерба для интенсивности.

Любая схема управления, позволяющая регулировать величину амплитуды согласно закону, полученному для оптимальной характеристики, может, как будет показано в дальнейшем, существенно понизить мощность, потребляемую в.ч. системой, и значительно облегчить тепловой режим всех узлов.

II. Методика измерений

Для снятия оптимальной амплитудно-частотной характеристики необходимо иметь сеточный модулятор, аналогичный описанному в работе,^{19/}

и позволяющий подавать на сетку в.ч. генератора импульсы напряжения отрицательной полярности, у которых регулируется амплитуда, длительность и положение во времени относительно начала цикла ускорения.

При снятии оптимальной характеристики фиксируется амплитуда ускоряющего напряжения до и после подачи на сетку генератора импульса от сеточного модулятора, а также частота, на которой создается искусственное уменьшение амплитуды.

Амплитуда и частота ускоряющего напряжения измеряются в динамическом режиме при помощи методики, описанной в работе^{/10/}, и дающей точность при измерении частоты $\pm 0,025\%$, при измерении относительной величины амплитуды $\pm 3\%$ и при измерении абсолютной величины амплитуды $\pm 8,5\%$.

Понижение амплитуды ускоряющего напряжения производилось до такого значения амплитуды, пока интенсивность пучка ускоренных частиц оставалась неизменной, а незначительное дальнейшее уменьшение амплитуды приводило к резкому падению интенсивности. После этого амплитуда увеличивалась до значения, при котором интенсивность равна первоначальной.

III. Результаты эксперимента

Первая серия экспериментов проводилась с узким манипулирующим импульсом отрицательной полярности, длительность которого была $100 \pm 0,6$ мксек. Период фазовых колебаний лежит в пределах 10–15 мксек (для частоты модуляции порядка 100 гц)^{/9/}. Результаты этих экспериментов приведены на графиках рис. 1. На рис. 2 приведена кривая, характеризующая превышение потребляемой мощности над оптимальной. Из рисунков 1 и 2 видно, что в отдельных точках без потери интенсивности можно уменьшить амплитуду ускоряющего напряжения примерно на 30 %, а среднюю потребляемую мощность - почти в два раза.

На рис. 3 приведены любезно представленные А.Н.Сафоновым, зависимости $\cos \phi$ от радиуса, подсчитанные с учётом нешеллевого набора энергии ионами в центральной области ($R = 0+50$ см) для рабочей и оптимальной амплитудно-частотных характеристик. Для сравнения приведен

график, характеризующий допустимый рост $\cos\phi$ в функции радиуса (начиная с $R=20$ см, где кончается формирование пучка) и вычисленный из условия адиабатического затухания фазовых колебаний в процессе ускорения^{/11/}.

Как видно из рис. 3б, $\cos\phi$, полученный при оптимальной характеристике, ближе к адиабатическому (3ω), а в диапазоне радиусов от 160 до 190 см устраняются фазовые потери.

Для приближения амплитудно-частотной характеристики (рис. 1а) к оптимальной (рис. 1б) была проведена вторая серия экспериментов с модулирующими импульсами отрицательной полярности длительностью 1,0 – 1,5 мсек, при помощи которых уменьшалась амплитуда ускоряющего напряжения сразу на больших частях периода модуляции в.ч. генератора. Длительность манипулирующего импульса выбиралась таким образом, чтобы он вписывался в отрезок амплитудно-частотной характеристики, где требуется понижение амплитуды для ее приближения к оптимальной. При проведении этой серии экспериментов сначала при минимальной амплитуде манипулирующего импульса увеличивалась его длительность до тех пор, пока интенсивность не начинала падать, затем длительность уменьшалась до восстановления первоначальной интенсивности, и увеличивалась амплитуда.

Во всех экспериментах критерием служила интенсивность пучка ускоренных частиц, соответствующая первоначальным параметрам ускорителя. Напряжение питания сеточного модулятора было выбрано 1000 в. Полученные после частичной коррекции амплитудные характеристики представлены на рис.4.

Была проведена и третья серия экспериментов, в которой коррекция осуществлялась одновременно повышением ограничивающих интенсивность минимальных амплитуд^{/9/} и понижением ненужно больших. Сначала компенсировалась пониженная амплитуда ускоряющего напряжения на частотах 18,5 и 15,5 Мгц при помощи положительных П-образных импульсов длительностью порядка 400 мсек, подаваемых на сетку в.ч. генератора. При этом интенсивность начинала расти. Амплитуда импульсов увеличивалась до тех пор, пока не прекращался рост интенсивности. Затем при помощи отрицательных П-образных импульсов, расположенных во вре-

мени между положительными, амплитуда ускоряющего напряжения понижалась до тех пор, пока не начиналось уменьшение интенсивности. После этого амплитуда несколько повышалась до получения первоначально повышенной интенсивности. При работе в таком режиме, несмотря на повышение интенсивности на 15–20%, автогенератор работал с меньшими токами сетки и катода, и можно было повысить напряжение анодного питания для восстановления первоначально потребляемой мощности. Повышение анодного напряжения приводило к некоторому дополнительному повышению интенсивности.

Результаты эксперимента приведены на графиках рис. 5.

В ы в о д ы

1. Методика снятия динамической характеристики^{/10/} и аппаратура, аналогичная описанной в работе^{/9/}, позволяют получить оптимальную амплитудно-частотную характеристику синхроциклотрона.

2. Следует ожидать, что существующая в настоящее время интенсивность может быть получена с потреблением мощности почти вдвое меньшим, чем в существующем режиме.

3. Расчётное значение $\cos \phi_{\text{э}} = f(R)$ для экспериментально снятой оптимальной характеристики ближе к значению $\cos \phi_{\text{э}}$, вычисленного с учётом адабатического затухания фазовых колебаний в процессе ускорения, чем расчётное значение $\cos \phi_{\text{э}}$ для существующей амплитудно-частотной характеристики.

4. При наличии соответствующей импульсной или в.ч. аппаратуры можно сформировать оптимальную амплитудно-частотную характеристику при той же мощности, потребляемой в.ч. системой.

5. При осуществлении оптимальной характеристики и сохранении неизменной потребляемой мощности следует ожидать дополнительного увеличения интенсивности при повышении частоты модуляции пропорционально напряжению.

В заключение авторы выражают благодарность В.И.Данилову за интерес, проявленный к работе, В.И.Иванову за активное участие в настройке аппаратуры и измерениях и А.Н.Сафонову за полезную дискуссию.

Л и т е р а т у р а

1. D. Bohm and L.L. Foldy. *Phys. Rev.*, **72**, 649 (1947).
2. Б.И.Замолодчиков, Д.Л.Новиков, Э.А.Полферов. Препринт ОИЯИ, Р-720, 1961.
3. P. Lapostolle *Conf. on High energy Cyclotron Improvements, Williamsburg, 6-8 Febr., 1964.*
4. А.Н.Сафонов. Препринт ОИЯИ Б1-1874, 1965.
5. F.M. Pussel *Nature*, Vol. 190, N4773, 355 (1961).
6. J. Lefrancios *Duty Cycle Improvements on the Harvard Synchrocyclotron, Cyclotron Laboratory, Harvard University, Cambridge, Mass., (1962).*
7. В.И.Данилов, И.Б.Енчевич, Б.И.Замолодчиков и др. АЭ т.16, вып. 1, 9-11, 1964.
8. В.И.Данилов, И.Б.Енчевич, Э.А.Полферов, А.Н.Сафонов. АЭ т.21, вып.5, 402, 1966.
9. И.Б.Енчевич, Т.Н.Томилина. Препринт ОИЯИ Р9-3805, 1968.
10. И.Б.Енчевич, Т.Н.Томилина. Препринт ОИЯИ, Р9-3970, 1968.
11. MSC Staff Proposal for the improvement of the 600 MeV synchrocyclotron CERN, MSC internal Report 67-5, 1st August (1967).

Рукопись поступила в издательский
отдел 11 июля 1968 г.

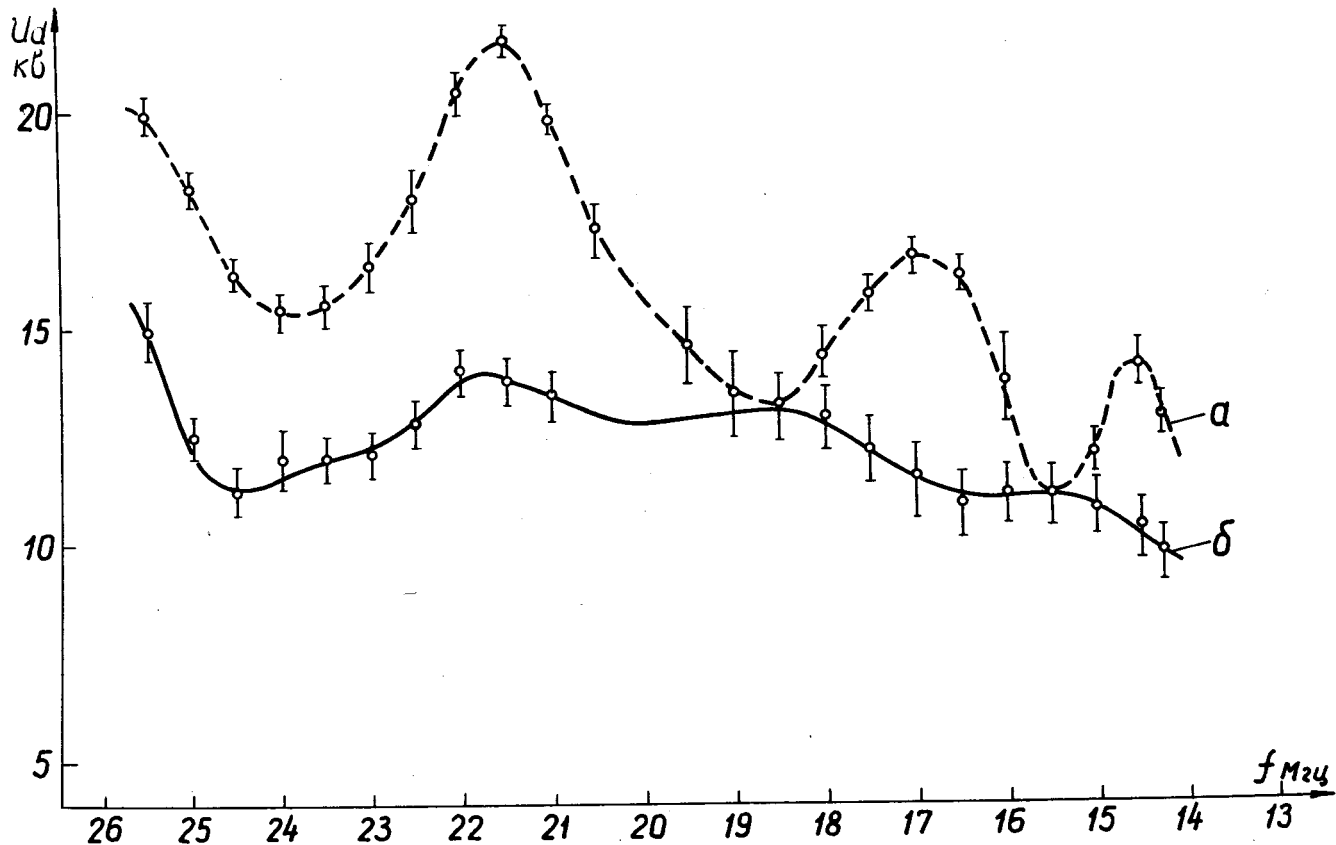


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики синхроциклотрона на 680 Мэв:

- а) рабочая (реально существующая);
- б) оптимальная.

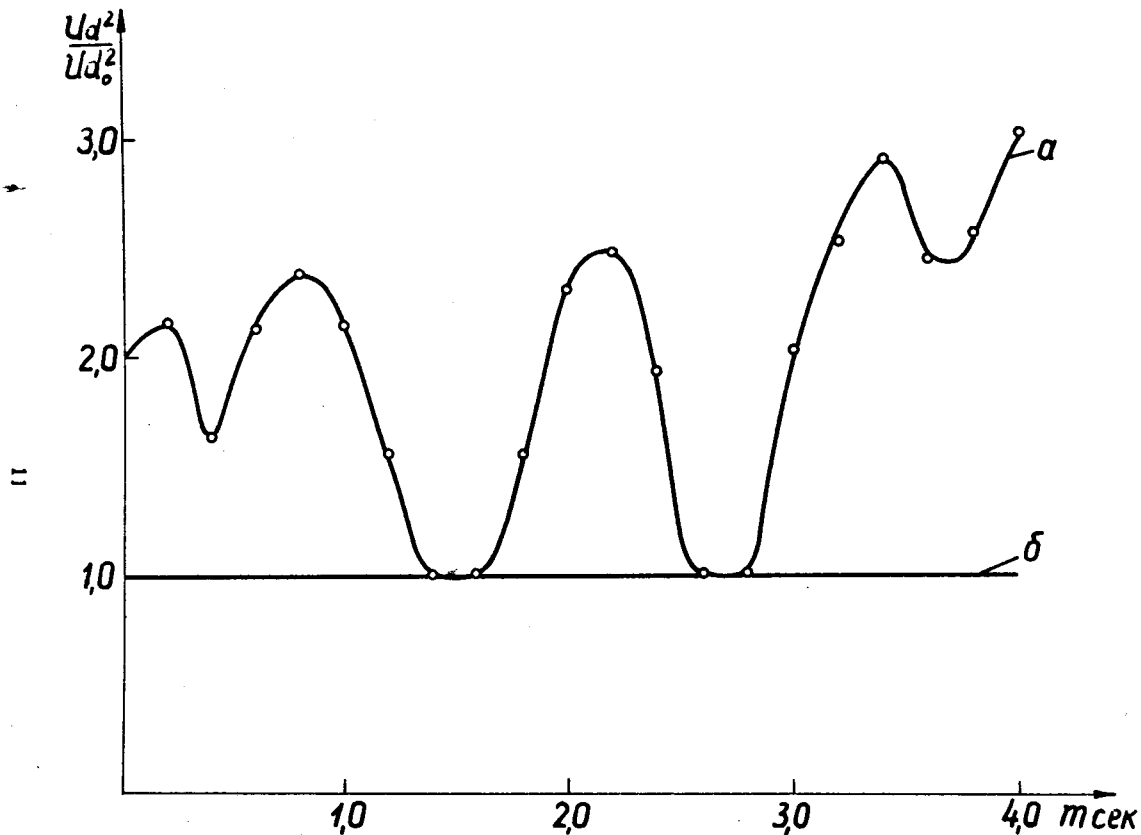


Рис. 2. Мощность, потребляемая в.ч. системой в функции времени:
 а) для рабочей характеристики (рис. 1а);
 б) для оптимальной (рис. 1б).

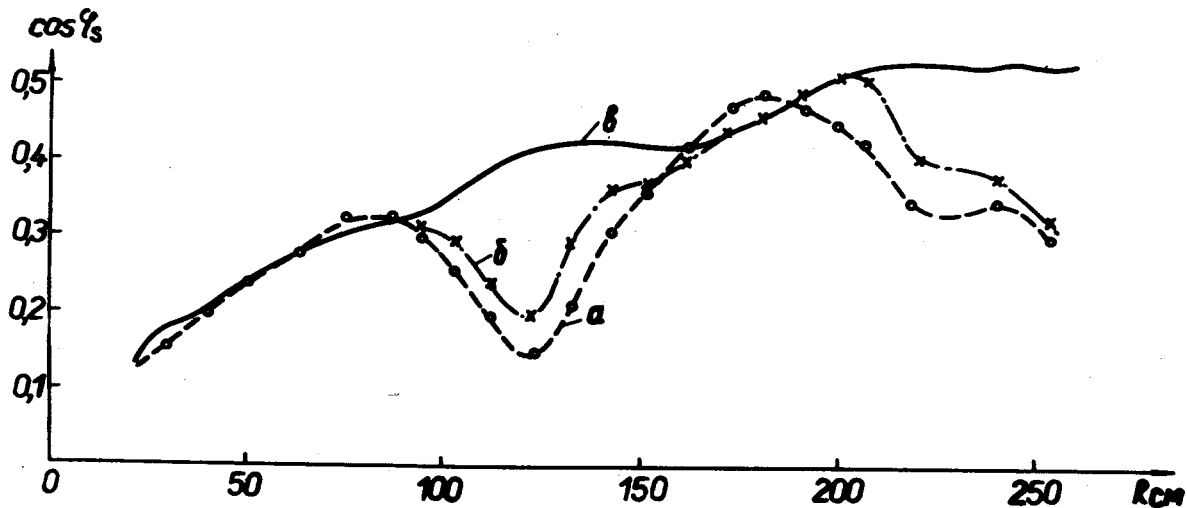


Рис. 3. Зависимость $\cos \phi_s$ от радиуса:
 а) для рабочей характеристики (рис. 1а);
 б) для оптимальной характеристики (рис. 5б);
 в) адиабатический $\cos \phi_s$, учитывающий уменьшение амплитуд радиальных колебаний в процессе ускорения.

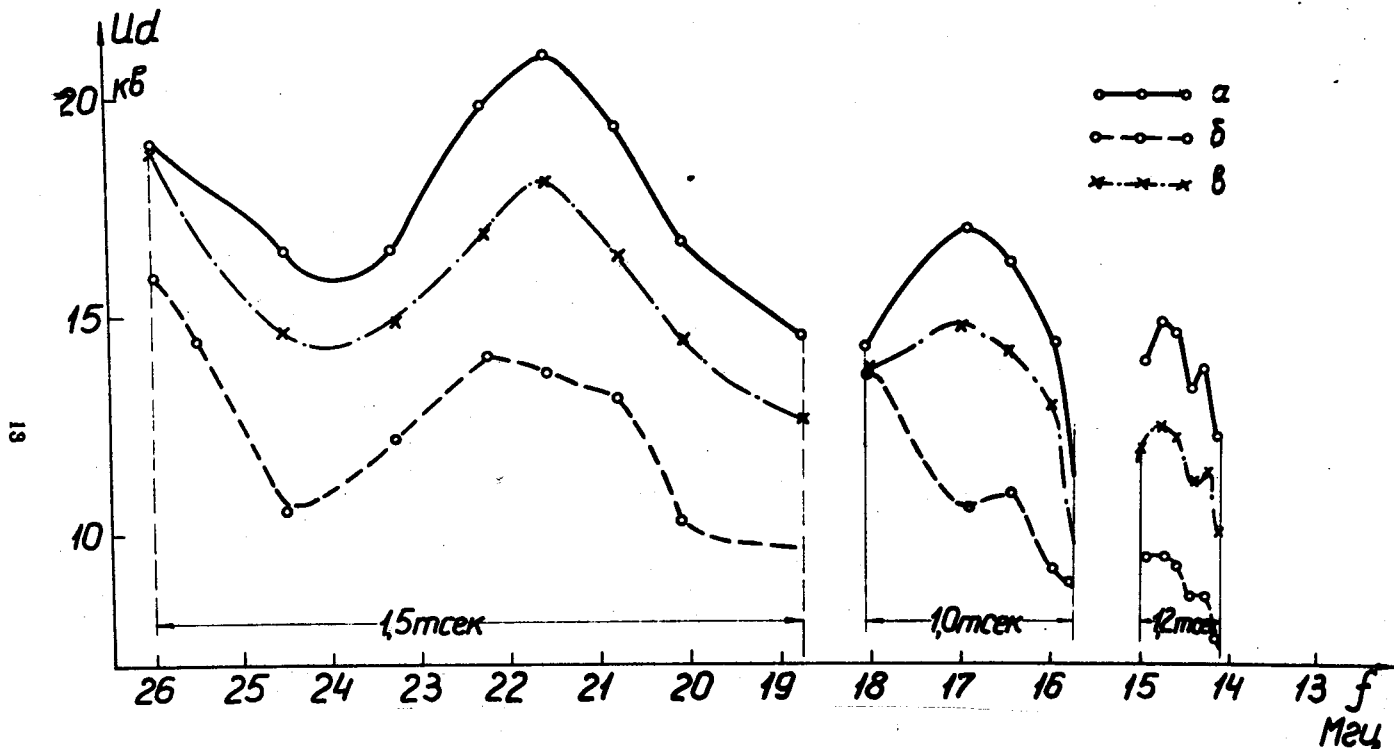


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики:

- а) рабочая;
- б) оптимальная;
- в) после коррекции при помощи широкого импульса (длительность импульса указана на графике). Понизить амплитуду ускоряющего напряжения на большей части периода модуляции до величины оптимальной не позволила малая мощность выпрямителя, питающего модулятор.

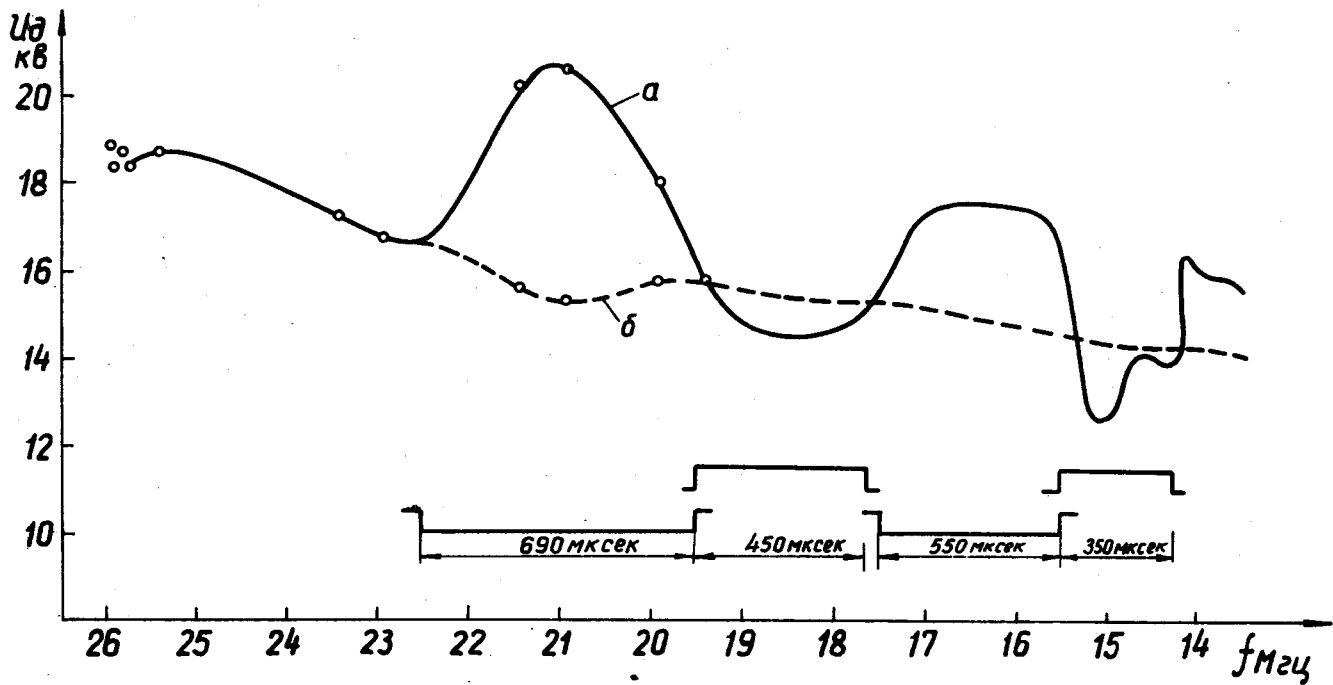


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики;
 а) рабочая;
 б) после коррекции положительными и отрицательными импульсами.