

С 345.0

Б-895

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

30/x-65

P-2375



Н.Г. Борисов, В.А. Вагин, В.Д. Володин,
В.И. Зайцев, Н.Н. Пляшкевич, А.П. Саенко,
И.Н. Семенюшкин, В.Л. Степанюк

СИСТЕМА КРАТНОГО УСКОРЕНИЯ
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА
ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

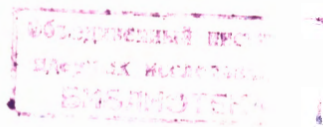
ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

1965

3625/3 48.

Н.Г. Борисов, В.А. Вагин, В.Д. Володин,
В.И. Зайцев, Н.Н. Пляшкевич, А.П. Саенко,
И.Н. Семенюшкин, В.Л. Степанюк

СИСТЕМА КРАТНОГО УСКОРЕНИЯ
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА
ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ



§ 1. Введение

В состав электродинамического сепаратора частиц высоких энергий ОИЯИ, построенного на принципе высокочастотной сепарации частиц по массам, который предложен в 1957 году В.И.Векслером и В.А.Петуховым^{/1,4/}, входит система кратного ускорения протонов на частоте $f_p = 149,550$ Мгц.

Система кратного ускорения осуществляет перехват ускоренных до максимальной энергии протонов в режим ускорения на кратной частоте (кратность $q = 104$) и производит дальнейшее ускорение на этой частоте в течение 15–20 мсек. При последующем взаимодействии перезахваченного пучка с мишенью осуществляется формирование периодически следующих друг за другом коротких сгустков вторичных частиц, необходимых для сепарации пучка высокочастотным отклоняющим устройством.

§ 2. Блок-схема и основные параметры установки

Одним из основных параметров системы кратного ускорения (и электродинамического сепаратора в целом) является рабочая частота f_p . С точки зрения общей длины сепаратора и габаритов высокочастотных устройств f_p должна быть возможно большей. С другой стороны, с увеличением f_p , а, следовательно, кратности ускорения, растет величина напряжения на щели резонаторов U_p , необходимая для получения требуемого коэффициента перезахвата. Кроме того, максимальное значение f_p ограничивается апертурой камеры синхрофазотрона (2000×500 мм²). Рабочая длина волны λ_p должна быть больше критической для основной моды E_{11} , возбуждаемой резонаторами в камере. Критическая длина волны для моды E_{11} составляет $\lambda_{kp1} = 1$ м. Однако за счет незначительной геометрической асимметрии конструкции резонатора, связанной с неточностью изготовления, деформацией в процессе эксплуатации и др., в камере может возбуждаться низшая мода H_{01} , критическая длина волны для которой составляет $\lambda_{kp2} = 4$ м. Поэтому для обеспечения полного отсутствия излучения высокочастотной мощности в камеру необходимо, чтобы λ_p была больше λ_{kp2} . С учетом приведенных соображений рабочая длина волны была выбрана $\lambda_p = 2$ м.

Решающим фактором при этом оказалась большая длина сепаратора. Необходимо отметить, что выбор $\lambda_p < \lambda_{kp2}$ привел к дополнительным трудностям, связанным с необходимостью подавления излучения на моде H_{01} .

Для получения достаточно высокого коэффициента перехвата протонов в режим кратного ускорения ($\sigma \approx 0,7$) на выбранной нами рабочей частоте требуется суммарная амплитуда ускоряющего напряжения в резонаторах $U_p \approx 250$ кв. Указанная величина U_p была определена из кривой 1 (рис. 2), рассчитанной по данным работ [1,2,3] при энергии протонов $E = 10$ Гэв, энергетическом спектре $\Delta E = \pm 2,8$ Мэв и кратности $q = 104$. Из этой кривой видно, что существенное увеличение σ с ростом U_p имеет место лишь до значений $\sigma = 0,65 - 0,75$.

Эффективность перезахвата протонов зависит также от того, насколько точно переменная ускоряющая частота синхротрона $f_{1(q)}$ в момент включения системы кратного ускорения соответствует кратному значению f_{1q} , т.е. насколько точно выполняется условие

$$f_{1q} = \frac{f_p}{q} \quad (1)$$

При максимальной амплитуде радиально-фазовых колебаний протонов в конце цикла ускорения $\rho_k = \pm 2,1$ см^{1/2}, что соответствует частотному отклонению $\Delta f_{1p} = \pm 900$ гц, максимально допустимая ошибка для частоты f_{1q} в момент включения должна быть, по-видимому, не хуже:

$$\Delta f_{1q} \leq \pm 0,1 \Delta f_{1p} \approx \pm 100 \text{ гц.} \quad (2)$$

Основные узлы системы кратного ускорения представлены на блок-схеме рис. 1. Запуск системы производится с помощью схемы сравнения частот 1. Бланкирующая схема 2 предотвращает повторный запуск системы на спаде магнитного поля ускорителя. Импульсный модулятор формирует высоковольтные импульсы, поступающие на аноды генераторных ламп. Два оконечных каскада блока высокочастотных генераторов 11, 12 осуществляют независимое питание резонаторов 16, 17 с помощью жестких коаксиальных фидеров. Для фазировки напряжения на резонаторах служит фазовращатель 13, позволяющий плавно изменять фазу от 0 до 180°. Рефлектометры 14, 15 контролируют согласование и уровень мощности, поступающей в резонатор.

§ 3. Описание установки

Каждый из обоих резонаторов системы представляет собой четвертьволновой отрезок коаксиальной линии с прямоугольным поперечным сечением. Сечение внешнего проводника резонатора 495×1750 мм², внутреннего - 310×1565 мм². Длина резонатора

без экранов 505 мм, с экранами для подавления излучения - 1380 мм. Собственная добротность резонатора $Q_0 = 5000$, шунтовое сопротивление $R_{ш} = 40$ ком, подводимая мощность к каждому резонатору $P = 150$ квт. Для подавления резонансного высокочастотного разряда применяется система определенным образом расположенных в резонаторе электродов, на которые подается напряжение $E_{см} = 2$ кв. Возникающая из-за незначительной асимметрии резонатора мода H_{01} подавляется путем юстировки резонатора после установки в камеру.

Блок высокочастотных генераторов (рис. 3) состоит из пяти мощных генераторов с независимым возбуждением на отрезках коаксиальных линий. Первый генератор собран на лампе ГУ-37Б, остальные четыре - на ГИ-24А. Схематический чертеж одного из генераторов на ГИ-24А представлен на рис. 4. Анодная линия генератора 5 имеет длину $3/4 \lambda$. Анодная разделительная емкость 3 находится на внутреннем проводнике линии в узле тока. Настройка анодного контура осуществляется с помощью короткозамыкающего плунжера 6, передвигаемого с помощью электрического привода 7 дистанционно. Катодный контур генератора настраивается с помощью емкостного шлейфа 10. На вход блока генераторов подается мощность $P_{вх} = 500$ вт, поступающая от предварительного трехкаскадного усилителя (рис. 5), расположенного в отдельной стойке блока высокочастотных генераторов (рис. 3). Предварительный усилитель собран на лампах 6НЗП (Л1), ГУ-32 (Л2) и ГУ-29 (Л3). Контуров двух последних каскадов L_4, L_5, L_6, L_7 выполнены в виде двухпроводных линий. Контуров первого каскада L_1, L_2, L_3 состоят из элементов с сосредоточенными параметрами. На вход предварительного усилителя поступает мощность $P_{вх} = 0,5$ вт от задающего генератора, стабилизированного кварцем.

Импульсный модулятор (рис. 6, 7) имеет следующие параметры: мощность в импульсе $P_u = 1$ Мвт, длительность импульса $t_u = 15-20$ мсек, скважность $Q = 450$, длительность переднего фронта $t_{ф1} = 1,5$ мсек, заднего фронта $t_{ф2} = 2$ мсек, спад вершины $\delta = 15\%$. Он построен на лампах ГИ-18Б по схеме с частичным разрядом емкости. Выбор ламповой схемы обусловлен желанием получить максимальную гибкость параметров выходного импульса модулятора и нечувствительность к нагрузке (генераторам), сопротивление которой при расстройке или пробоях резонаторов может сильно изменяться. Характеристики используемых нами электровакуумных приборов ГИ-18Б, ГИ-24А, ГУ-37Б, ГУ-29 и других рассчитаны на применение при длительности импульса менее 1000 мсек, но имевшиеся у нас экспериментальные данные ^{15,8/} показали возможность их использования при длительностях вплоть до 50 мсек без существенного ухудшения параметров. Оконечный (Л2, Л3, Л4) и предоконечный (Л1) каскады модулятора для получения положительной полярности выполнены в виде импульсных усилителей с катодной нагрузкой. Изготовление импульсного трансформатора на мощность 1 Мвт

при длительности 15–20 мсек представляет серьезные трудности, поэтому в оконечных каскадах модулятора он не применяется. Лишь на входе Л1, где уровень мощности составляет 1,5 квт, применяется импульсный трансформатор Тр. 1. Основные данные Тр. 1: сечение железа $S = 72 \text{ см}^2$, количество витков первичной обмотки $W_1 = 3500$ витков, вторичной $W_2 = 2000$ витков, слои вторичной обмотки расположены между слоями первичной. Ввиду того, что в данной схеме вторичная обмотка Тр- 1 находится под полным выходным напряжением модулятора, через паразитную емкость между обмотками Тр- 1 осуществляется обратная связь, которая ухудшает фронты импульса модулятора. Для проверки этого предположения катоды оконечных ламп Л2, Л3, Л4 заземлялись (осуществлялась схема модулятора с отрицательной полярностью выходного импульса). Тогда передний фронт импульса модулятора составлял лишь 0,1 мсек, что подтверждает вышеприведенное предположение. Выпрямители -200в, +6 кв, -600 в и вторичные обмотки трансформаторов Тр, 1, Тр. 2, Тр. 3, Тр. 4, Тр. 5 находятся под полным выходным напряжением модулятора. Конденсаторные батареи С1, С2, С3 состоят из емкостей типа ИМ-3/100.

Схема сравнения частот 1 (рис. 1) состоит из кварцевого фильтра на 100 кгц, высокостабильного гетеродина с частотой $f_2 = 1535 - 1540$ кгц (стабильность 10^{-5}) и смесителя. На вход смесителя поступает переменная частота синхрофазотрона $f_{1(v)}$ и частота гетеродина $f_Г$. С выхода смесителя частота $f_Г - f_{1(v)}$ подается на кварцевый фильтр. Частота гетеродина установлена точно на 100 кгц выше частоты $f_{1q} = 1438$ кгц. При этом схема сравнения частот вырабатывает импульс точно в момент соблюдения условия кратности (1). Экспериментально измеренная точность схемы $\Delta f_{1q} = \pm 30$ гц. Схема сравнения частот запускает четырехканальный фантастроный блок задержек, который служит для синхронизации остальных узлов сепаратора. Срыв основной ускоряющей частоты производится с задержкой на 2 мсек, чтобы предотвратить сворачивание пучка протонов за время установления высокочастотного напряжения системы. Управление и контроль за работой всей системы производится с общего пульта (рис. 8).

§ 4. Экспериментальные результаты

Были проведены эксперименты по перезахвату ускоренных протонов в режим кратного ускорения на кратности $q = 104$ при энергии протонов $E = 10$ Гэв. При этом использовался один резонатор, напряжение на щели которого изменялось от 20 до 70 кв (амплитудное значение). Перезахват и ускорение на кратной частоте регистрировались с помощью индукционных электродов. Более подробные данные о методе регистрации перезахвата протонов приведены в работе ^{/3/}. Экспериментально

полученная зависимость коэффициента перезахвата протонов σ от напряжения на щели резонатора U_p представлена на рис. 2, кривая 3. Она довольно близка к расчетной (кривая 1). Кривая 2 представляет результаты по перезахвату протонов с использованием нелавно разработанной в радиотехническом отделе системы подавления синхротронных колебаний. При этом энергетический спектр ускоренного пучка стал уже по сравнению с данными работы ^{/2/} ($\Delta E = \pm 1,7$ Мэв вместо $\Delta E = \pm 2,8$ Мэв). В связи с этим оказалось возможным получить требуемый коэффициент перезахвата $\sigma = 0,7$ при напряжении на щели резонатора $U_p = 70$ кв, вместо рассчитываемых ранее 250 кв.

На рис. 9 изображена зависимость коэффициента перезахвата протонов σ от точности соблюдения кратного соотношения частот f_p и f_{1q} при $\Delta E = \pm 1,7$ Мэв. Из кривой видно, что отклонение по частоте от оптимального значения на 200 гц приводит к уменьшению σ с 0,80 до 0,50, то есть на 20%. Поэтому выбранная нами точность схемы сравнения частот $\Delta f_{1q} = \pm 100$ гц является оправданной.

Были исследованы фазовые характеристики системы, так как привязка ее по фазе по отношению к отклоняющей системе сепаратора должна быть не хуже $\Delta\phi \leq +10^\circ$. При подъеме анодного напряжения генераторов с 2,5 до 7 кв (соответствующего 70 кв на щели резонатора) фаза напряжения на щели резонатора изменялась на 17° , причем в начале подъема это изменение составляло 7° на киловольт, а в районе 7 кв - $1,5^\circ$. Этот уход фазы связан с изменением угла отсечки генераторов и особых неприятностей не доставляет, так как работа системы обычно происходит при анодном напряжении 7 кв. Кроме того, было замечено изменение фазы в связи с нагревом резонатора в процессе работы системы. Это изменение (порядка 25°) происходило в течение первых двух часов работы. В дальнейшем изменения фазы напряжения на резонаторе не наблюдались. Поскольку конструкция резонатора не позволяет применить водяное охлаждение с термостатированием воды, то для достижения требуемой фазовой стабильности системы требуется предварительная тренировка в течение примерно двух часов.

Исследовался разброс энергии перезахваченного пучка, вызванный тем, что синхронизация системы кратного ускорения осуществляется с привязкой к ускоряющей частоте синхрофазотрона, а не к магнитному полю. Требуемый разброс энергии захваченного пучка $\pm 0,5\%$ наблюдался лишь в 80% случаев перезахвата, в остальных доходил до $\pm 1,5\%$. Поэтому в будущем предполагается в конце цикла ускорения синхрофазотрона переходить в режим ускорения на постоянной частоте $f_{1q} = 1438,1$ кГц, а синхронизацию системы кратного ускорения осуществлять с привязкой к магнитному полю, что обеспечит энергетический разброс перезахваченного пучка менее $\pm 0,3\%$.

Авторы выражают благодарность И.П.Голембевской, М.А.Головой, С.Н.Пляшкевичу и В.В.Шустрову за участие в наладке установки, а также сотрудникам отдела синхронотрона и радиотехнического отдела ЛВЭ за помощь при проведении экспериментов на ускорителе.

Л и т е р а т у р а

1. В.Н.Зубарев, В.С.Кладникий, А.Б.Кузнецов, С.В.Мухин, Л.С.Охрименко, Н.Б.Рубин, И.Н.Семенюшкин. Препринт ОИЯИ Р-371, Дубна 1959.
2. А.Б.Кузнецов, К.П.Мызников. Атомная энергия **5**, 373 1962 .
3. В.А.Вагин, А.Д.Панфилов, И.Н.Семенюшкин, В.Л.Степанюк, К.В.Чехлов. Препринт ОИЯИ 1406, Дубна 1963.
4. В.А.Вагин, В.И.Векслер, В.Н.Зубарев, А.Б.Кузнецов, С.В.Мухин, В.А.Петухов, В.А.Попов, Н.Б.Рубин, И.Н.Семенюшкин, В.Л.Степанюк, К.В.Чехлов. Труды Международной конференции по ускорителям, Дубна 1963.
5. В.А.Вагин, М.Высочанский, С.В.Мухин, С.В.Рихвицкий, И.Н.Семенюшкин, В.Л.Степанюк, И.Фолтин. Труды Международной конференции по ускорителям, Дубна, 1963.
6. В.А.Вагин, В.Д.Володин, А.Д.Панфилов, Н.Н.Пляшкевич, А.П.Саенко, И.Н.Семенюшкин, В.Л.Степанюк, К.В.Чехлов, Н.В.Шустров. Препринт ОИЯИ 1478, Дубна 1963.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 сентября 1965 г.

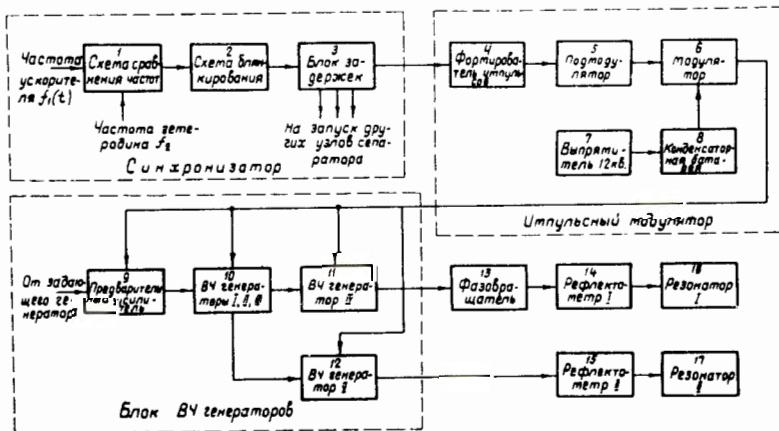


Рис. 1. Блок-схема установки.

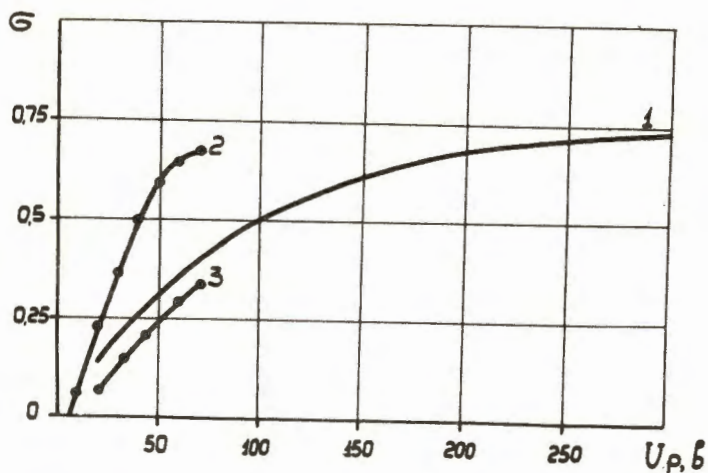


Рис. 2. Зависимость коэффициента перезахвата протонов в режим кратного ускорения σ от напряжения на шели резонаторов U_p . Энергия протонов $E = 10$ Гэв, кратность $q = 104$, частота кратного ускорения $f_p = 149,550$ Мгц. 1 - расчетная кривая, энергетический спектр пучка $\Delta E = \pm 2,8$ Мэв; 2 - экспериментальная кривая - энергетический спектр пучка $\Delta E = \pm 1,7$ Мэв; 3 - экспериментальная кривая, энергетический спектр пучка $\Delta E = \pm 2,8$ Мэв.

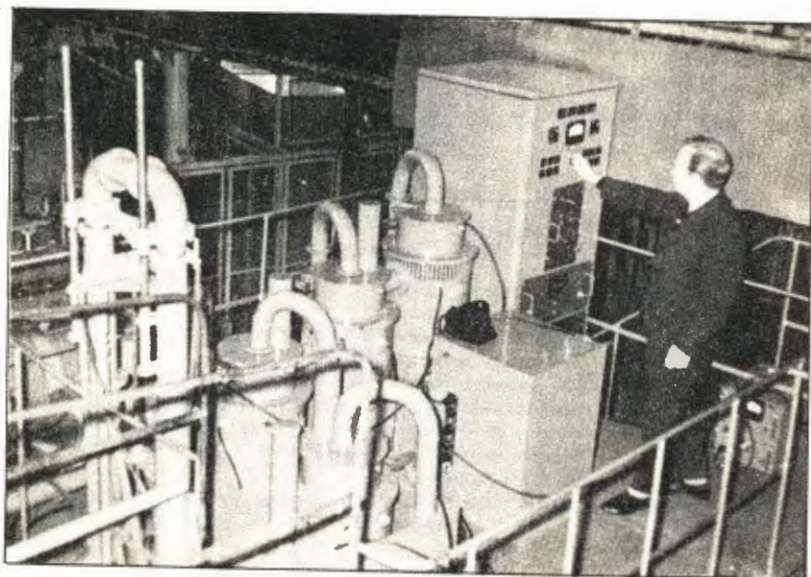


Рис. 3. Внешний вид блока высокочастотных генераторов.

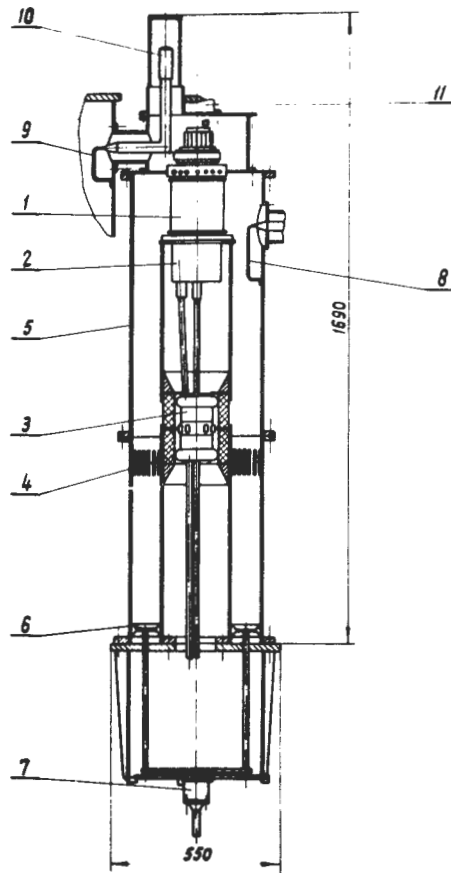


Рис. 4. Генератор на ГИ-24А.

1 - лампа ГИ-24а; 2 - бачок водяного охлаждения лампы; 3 - анодная разделительная емкость; 4 - изолятор; 5 - анодная линия; 6 - плунжер; 7 - электрический привод; 8 - выходная петля связи; 9 - входная петля связи; 10 - катодный емкостной шлейф; 11 - труба воздушного охлаждения.

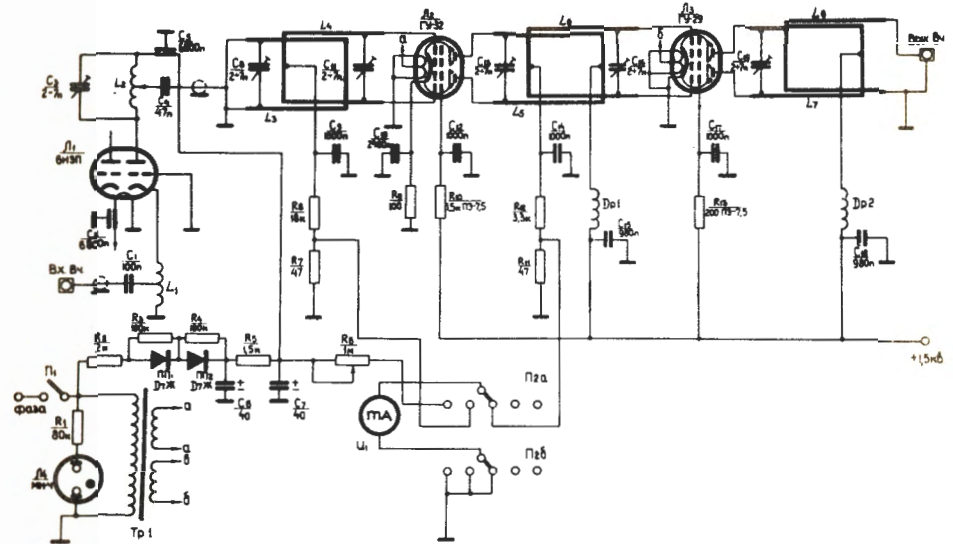


Рис. 5. Электрическая схема предварительного усилителя.

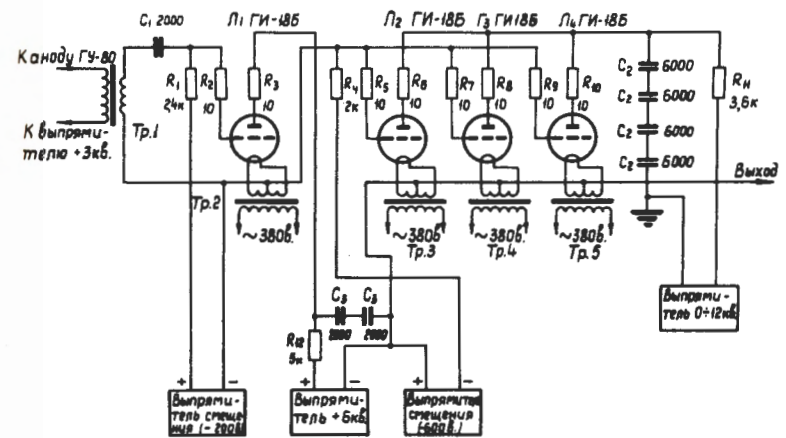


Рис. 6. Принципиальная схема оконечных каскадов импульсного модулятора.



Рис. 7. Внешний вид импульсного модулятора.



Рис. 8. Пульт управления.

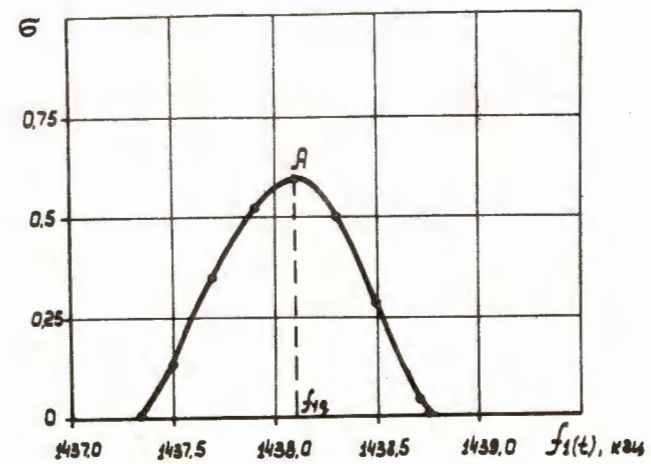


Рис. 9. Экспериментальная зависимость коэффициента перзахвата протонов в режим кратного ускорения σ от ускоряющей частоты синхрофазотрона в момент перзахвата $f_1(t)$ ($E = 10$ Гэв, $\Delta E = \pm 1,7$ Мэв).