

С 345 е 3

Д-183

16/IX-65

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P - 2281



В.И. Данилов, И.Б. Еячевич, Е.И. Розанов,
В.И. Смирнов, Т.Н. Томилина

УСТРОЙСТВО СИСТЕМЫ
РАСТЯЖКИ ПУЧКА ПРОТОНОВ
СИНХРОЦИКЛОТРОНА НА 680 МЭВ

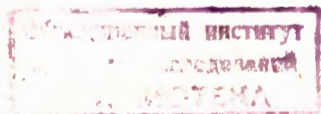
АЛБОМТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1965

P-2281

В.И. Данилов, И.Б. Енчевич, Е.И. Розанов,
В.И. Смирнов, Т.Н. Томила

УСТРОЙСТВО СИСТЕМЫ
РАСТЯЖКИ ПУЧКА ПРОТОНОВ
СИНХРОЦИКЛОТРОНА НА 680 МЭВ



3540/3 48.

В в е д е н и е

Увеличение длительности импульсов выведенного пучка мезонов осуществляется локальным возмущением магнитного поля ускорителя на последних рабочих радиусах^{/1/}, которое производится током, подаваемым импульсно в две катушки, расположенные внутри камеры ускорителя. Импульсы тока подаются синхронно с циклами ускорения после отключения ускоряющего напряжения.

Изменение локального магнитного поля во времени приводит к увеличению амплитуды вынужденных радиальных колебаний частиц. Для получения амплитуды радиальных колебаний порядка 10 см необходимо создать магнитное поле на площади 1200 см^2 (20 см по радиусу и 60 см по азимуту) напряженностью $8,8 \cdot 10^4 \text{ а·м}^{-1}$.

Такое поле создается двумя прямоугольными катушками размерами $850 \times 850 \times 106 \text{ мм}$ с числом ампервитков $IW = 40000 \text{ а}^{/2/}$. Конструкция катушек определялась, с одной стороны, требуемым магнитным полем, а с другой - возможностью монтажа и последующей эксплуатации их в вакуумной камере данного ускорителя.

Катушки питаются импульсами синусоидальной формы, которые создаются при разряде конденсаторных батарей через обмотки катушек при помощи коммутационных тириستоров.

Схема управления работой тиристорных позволяет осуществить питание катушек по заданной программе для обеспечения оптимального режима растяжки.

1. Конструкция и технология изготовления катушек

Каждая катушка состоит из 111 витков изолированной медной трубки, залитой эпоксидным компаундом "холодного" отверждения^{/3/}, и весит 80 кг.

Во избежание возникновения токов Фуко металлическая арматура сведена к минимуму, необходимому для крепления катушек к полюсам магнита внутри вакуумной камеры.

Катушки установлены симметрично относительно средней плоскости на расстоянии 140 мм друг от друга, что при высоте дуанта 120 мм обеспечивает свободное прохождение пучка. При уменьшении расстояния между катушками может быть достигнута большая напряженность магнитного поля, однако в этом случае ускоряемый пучок протонов будет частично рассеиваться на катушках и вследствие радиационного выхода газов из компаунда работа ускорителя станет неустойчивой.

Центр катушек находится на расстоянии 265 см от геометрического центра магнита.

Токопроводящие трубки выводятся из вакуумной камеры через проходные изоляторы из фторопласта-4. Для вакуумного уплотнения изоляторов, трубок и фланца камеры использованы резиновые прокладки.

Дистиллированная вода для охлаждения катушек подводится через изоляционные шланги параллельно верхней и нижней катушкам. Электрически катушки соединены последовательно. Индуктивность каждой катушки 6 мГн, суммарная индуктивность — 15 мГн.

Для намотки катушек использована медная трубка с наружным диаметром 8 мм и внутренним — 5 мм, обмотанная стеклолентой с нанесенным на нее слоем эпоксидного компаунда. Намотка каждой катушки производилась на шаблоне с габаритными размерами 650 x 100 x 98 мм. 11 витков намотаны 13 слоями по 9 или 8 витков в шахматном порядке (рис. 1).

Зазоры между витками фиксированы прокладками, вырезанными из полиэтиленовой трубки; в совокупности со стеклолентой это обеспечивает межвитковое расстояние около 2,5 мм. Сечение обмотки составляет 98 x 120 мм. После намотки катушка помещалась в открытую форму, размеры которой на 10 мм превышали габаритные размеры намотки, и заливалась следующим составом ^{1/4}:

- эпоксидный компаунд К-156 100 в.ч.
- наполнитель—пылевидный кварц 100 в.ч.
- отвердитель—полиэтиленполиамин 15 в.ч.

Отверждение происходило при температуре 20–25°С. Для монолитности и равномерного заполнения межвиткового пространства применялась вибрация. После заливки катушки выдерживались около суток при комнатной температуре, а затем в течение суток подвергались термообработке в сушильной печи с постепенным нагревом до 120°С.

В средней части катушек при заливке оставались четыре отверстия, армированные разрезными втулками из нержавеющей стали. Через эти отверстия катушки крепятся болтами к кронштейнам, расположенным на полюсах магнита. Конструкция кронштейнов позволяет перемещать катушки на ± 5 см по радиусу.

Выводные концы токопроводящих трубок после обмотки стеклолентой свивались бифлярно и обмазывались эпоксидным компаундом. Непосредственно у катушек участок

трубок заливался компаундом в виде бокового прилива к основному телу катушки. Это позволило погасить вибрации трубок, которые возникают вследствие взаимодействия тока с магнитным полем ускорителя.

2. Результаты испытаний

Наружная поверхность изоляционного покрытия обеих катушек несколько больше 1 м^2 . Начальное газовыделение приводит к некоторому увеличению времени откачки камеры ускорителя от атмосферного давления до высокого вакуума по сравнению с откачкой без катушек. В процессе тренировки газовыделение значительно уменьшается и общее натекание в камеру становится меньше 10 л.мк.сек^{-1} , что практически не отличается от натекания без катушек. При этом предельный вакуум составляет около $2 \cdot 10^{-6}$ мм.рт.ст.

В отсутствие тока в катушках циркулирующий "нерастянутый" пучок не вызывает существенного увеличения газовыделения, рабочий вакуум сохраняется в пределах $6 \cdot 10^{-6}$ - $1 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. даже без охлаждения катушек.

При введении в пучок мезонной мишени вакуум ухудшается до $1 \cdot 10^{-5}$ - $1,5 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. вследствие увеличения газовыделения из катушек под действием рассеянного на мишени пучка. Вакуум восстанавливается лишь при наличии охлаждения. Длина трубки в каждой катушке около 200 м, проток воды под давлением 6 кг.см^{-2} составляет около 1 л.мин^{-1} .

При нагрузке перепад температуры охлаждающей воды составляет 20°C . Температура выходящей воды обычно не превышает 40°C . В этих условиях до начала процесса ускорения не происходит существенного ухудшения вакуума. При включении ускорителя для вывода растянутого пучка с мезонной мишени рассеянное излучение значительно увеличивает газовыделение. При среднем токе в катушке 80-80а вакуум в процессе ускорения составляет $1,0 \cdot 10^{-5}$ - $1,5 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. При увеличении тока до 100а наблюдается ухудшение вакуума до $2,0 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст., что соответствует газовыделению свыше $100 \text{ л.мк.сек}^{-1}$ и приводит к неустойчивой работе ускорителя /5/.

3. Система питания

Система питания катушек растяжки пучка состоит из выпрямителя и генератора синусоидальных импульсов тока (рис. 2).

В системе использован тиратронный выпрямитель с плавной регулировкой выпрямленного напряжения от 0,2 до 2,5 кв и номинальным током 110 а.

Синусоидальные импульсы тока создаются благодаря разряду конденсаторных батарей на катушки через коммутирующие тиратроны (рис. 3).

Ток, протекающий через катушки, определяется выражением^{/8/}:

$$i = \frac{E}{R_2} + \frac{\sqrt{(V_{C_0} R_2 - EaL)^2 + E^2 \omega^2 L^2}}{\omega L R_2} e^{-at} \sin(\omega t + \phi),$$

где V_{C_0} - напряжение на конденсаторе, E - напряжение выпрямителя, $a = \frac{L + R_1 R_2 C}{2LCR_2^2}$ - коэффициент затухания, $\omega = \sqrt{\frac{R_1 + R_2}{LCR_2^2}}$ - круговая частота, R_1 - активное сопротивление катушки, соединительных проводов и коммутирующего тириатрона, R_2 - зарядное сопротивление, L - индуктивность катушек, C - емкость конденсаторной батареи,

$$\operatorname{tg} \phi = - \frac{LE\omega}{V_{C_0} R - EaL}.$$

Схема питания катушек, использующая одну конденсаторную батарею, не позволяет получить импульсы тока в каждом цикле ускорения из-за большой постоянной времени заряда конденсаторов ($t \approx 14 \cdot 10^{-3}$ сек). Поэтому необходимо применять несколько конденсаторных батарей, которые разряжаются поочередно через катушки индуктивности синхронно с циклом ускорения.

Зная индуктивность катушек $L = 0,015$ гн и параметры схемы $R_1 = 0,5$ ом и $R_2 = 40$ ом, можно определить для длительности импульса $\tau = 8 \cdot 10^{-3}$ сек требуемую емкость конденсаторной батареи, которая оказывается равной $C = 3,5 \cdot 10^{-4}$ ф.

Расчет тока в катушках произведен для вариантов с 3-мя и 6-ю конденсаторными батареями при постоянном значении среднего тока источника питания $I = 110$ а. Данные приведены в таблице 1.

Таблица 1

Вариант	Число конденс. батарей	R_2 ом	E вт	P квт	i
1	3	40	1740	192	$43,5 + 157e^{-53t} \sin(445t - 0,303)$
2	6	40	1250	137	$31,2 + 175e^{-53t} \sin(445t - 0,183)$
3	3	30	1290	142	$43,0 + 140e^{-64,8t} \sin(445t - 0,314)$
4	6	30	1170	129	$39,1 + 173e^{-64,8t} \sin(445t - 0,227)$

Из сравнения различных вариантов схемы следует:

1. При увеличении числа конденсаторных батарей с 3 до 6 мощность, потребляемая от источника питания, уменьшается на 20%.

2. При использовании 6 конденсаторных батарей потребляемую мощность можно снизить путем уменьшения зарядного сопротивления до 20-30 ом.

3. Уменьшение зарядного сопротивления R_2 ниже 40 ом при 3 конденсаторных батареях приводит к значительному уменьшению амплитуды и фронта импульса тока.

4. Различные варианты рассматриваемой схемы не позволяют получать импульсы тока с временем нарастания больше, чем 4 мсек.

Б. Четвертый вариант имеет преимущества перед остальными и дает возможность получать импульсы тока амплитудой 200 а с временем нарастания 4 мсек при потребляемой мощности $P = 120$ квт.

4. Схема управления

Для увеличения длительности импульса пучка необходимо довести 20-30% ускоряемых частиц до мишени при помощи вч напряжения, затем ускоряющее напряжение отключить, при этом оставшаяся часть пучка достигнет мишени только после того, как один из коммутирующих тиристоров схемы питания пропустит через катушки синусоидальный импульс тока. Оптимальная интенсивность и длительность пучка достигаются подбором амплитуды и времени нарастания импульса тока, а также выбором момента отключения ускоряющего вч напряжения и задержки включения импульса тока через катушки в пределах от 0 до 0,25 периода модуляции.

а) Схема управления работой 3 конденсаторных батарей.

При работе в этом режиме ключ К на рис. 4 стоит в положении. 1 Первые два каскада схемы (L_1, L_2 на рис. 5) формируют из заднего фронта прямоугольных импульсов фотодатчика ^{/8/} импульсы отрицательной полярности, которые затем поступают на пересчетную схему на лампах L_3, L_4 . Пересчет на три осуществляется по схеме симметричного триггера с использованием обратной связи ($C = 130$ пф) для перевода схемы в исходное состояние после прихода каждого третьего импульса ^{x/}. Требуемая цикличность работы достигается формированием импульсов, снимаемых с различных точек пересчетной схемы в трех независимых каналах (L_5, L_6, L_7). С выходных каскадов на лампах L_8, L_9, L_{10} эти импульсы поступают на сеточные трансформаторы коммутирующих тиристоров системы питания.

Работа схемы иллюстрируется эфиромиями напряжений, приведенными на рис. 6 (1-10, номера эфир соответствуют точкам на блок-схеме на рис. 4).

^{x/} По сравнению с кольцевой данная схема пересчета на три содержит на один триггер меньше.

б) Схема управления работой 6 конденсаторных батарей.

В этом случае ключ К (рис. 4) находится в положении 2. Отключающие импульсы положительной полярности поступают на каскады предварительного формирования на лампах L_{19}, L_{20}, L_{10} (рис. 7) синхронно с частотой модуляции после снятия ускоряющего напряжения. Эти импульсы задерживаются при помощи фантастропа (L_1, L_2, L_3, L_8) на время до 0,25 периода модуляции. Затем они поступают на два каскада пересчетных схем (L_5, L_7 и L_9, L_{12}, L_{15}), обеспечивающих пересчет на шесть и после соответствующего формирования в независимых каналах ($L_{11}, L_{13}, L_{14}, L_{16}, L_{17}, L_{18}$ и $L_{21}, L_{22}, L_{23}, L_{24}, L_{25}, L_{26}$) попеременное включение с помощью тиратронов шести конденсаторных батарей.

Работа схемы иллюстрируется экурами напряжений, приведенных на рис. 6 (1-7 и 11-29 номера экур соответствуют точкам на блок-схеме рис. 4).

Схема управления питается от модифицированного выпрямителя УИП-1 с дополнительным стабилизированным выходом +300 в (рис. 8).

Б. Проектируемые улучшения.

В новом варианте катушек предусматривается разделение обмотки на две секции, что позволит в четыре раза увеличить проток воды и уменьшить нагрев катушек. Однако радиационный выход газов под действием рассеянного на мишени пучка по-прежнему может оставаться значительным при существующей технологии заливки. Применение смолы ЭД-8, модифицированной тхоколом с малеиновым ангидридом в качестве отвердителя, позволяет снизить радиационный выход газов, однако, увеличение вязкости за счет тхокола и режим горячего отверждения вызвали бы большие трудности при заливке.

Синусоидальные импульсы тока позволяют увеличить длительность пучка частиц по времени не более чем до половины периода модуляции. Для фазотрона на 880 Мэв это составляет 3-4 мсек. Для получения импульсов тока с временем нарастания более 4 мсек целесообразно использовать схему тиратронного триггера, в одно плечо которого включены катушки индуктивности ^{16,7/}. В этом случае импульсы тока имеют пилообразную форму и время нарастания тока можно увеличить до 6-7 мсек.

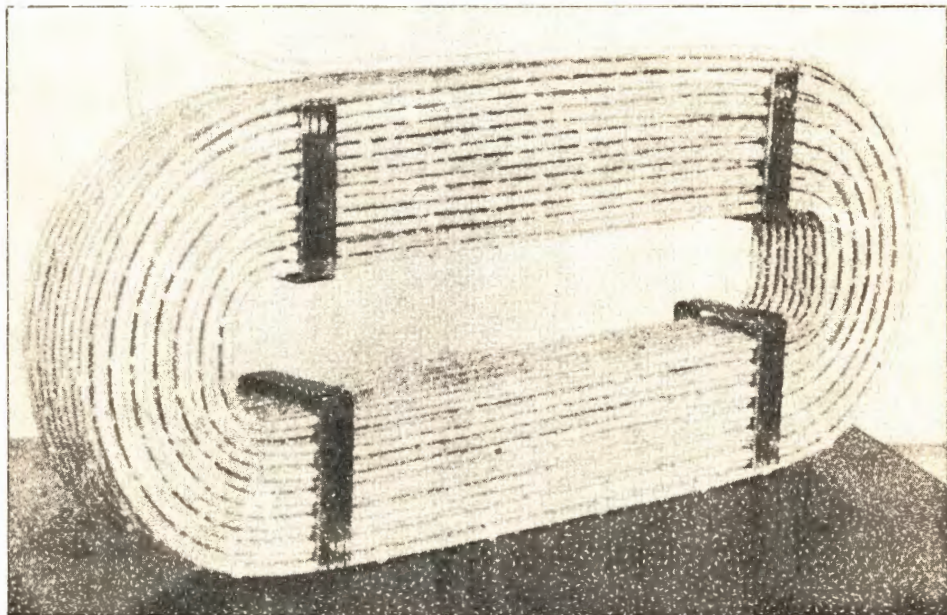
При использовании для питания катушек импульсов тока пилообразной формы, схема должна выдавать на запуск питающего устройства два импульса одновременно в момент, определяющий начало растяжки пучка и один импульс, задержанный относительно первых двух на время растяжки пучка (6-7 мсек).

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить И.М. Гурман за консультацию по ряду вопросов, И.Х. Ноздрин - за участие в разработке конструкции, К.А. Байчера - за руководство изготовлением и монтажом катушек в камере, В.Ф. Пермякова и Ф.Г. Игнатова - за участие в вакуумных испытаниях катушек, А.И. Смирнова, В.В. Ахманова, Г.К. Караваева - за монтаж и испытание электрооборудования, Б.И. Замолдчикова - за полезное обсуждение конструкции и схемы питания, А.И. Мухина и В.Г. Зянова - за участие в испытаниях катушек.

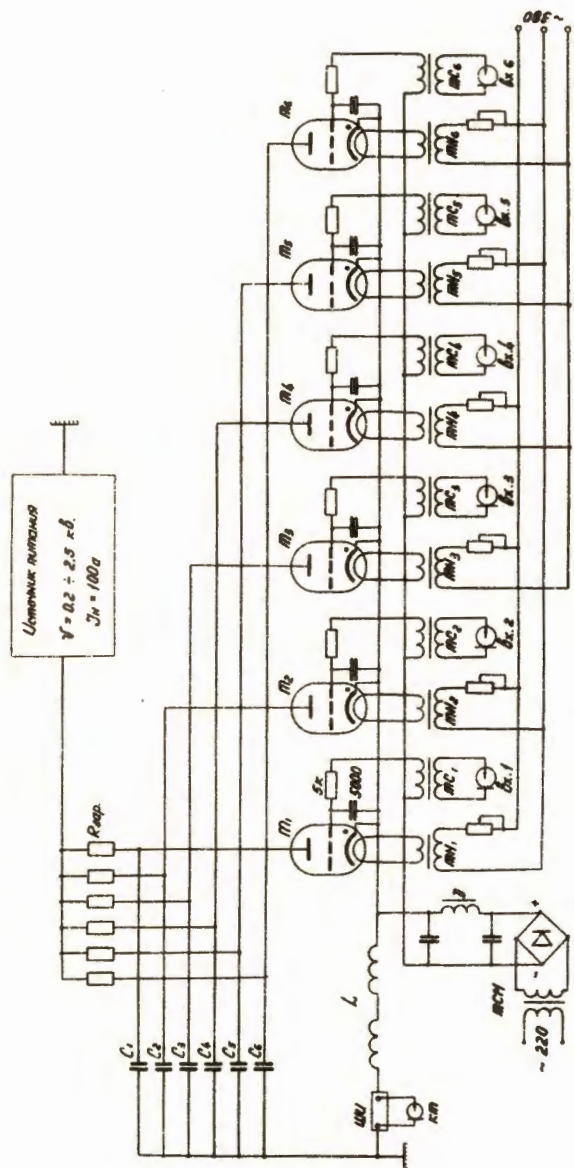
Л и т е р а т у р а

1. В.И. Данилов, И.Б. Енчевич, Б.И. Замолдчиков и др. "Увеличение длительности пучков частиц синхротрона на 880 Мэв. Препринт ОИЯИ Р-1885, Дубна (1985).
2. В.А. Бирюков, В.И. Данилов. Расчет магнитного поля прямоугольной катушки с током. ЖТФ, том XXXI, выпуск 4, 1981.
3. Г.М. Мартыгов, П.А. Фефелов. Сборник "Электрофизическая аппаратура", выпуск 3, Госатомиздат 1985.
4. Новые типы эпоксидных смол в компаундов. Сб. статей, Л. Знание.
5. В.Г. Рогозинский, Е.И. Розанов. Вакуумная система больших циклотронных ускорителей ОИЯИ. Препринт ОИЯИ 2077, Дубна (1985).
6. И.Л. Каганов. Электронные и ионные преобразователи, ч. 111. Госэнергоиздат 1958.
7. Б.Х. Кривяцкий. Элементы и устройства импульсной техники. Советское радио 1981.
8. В.И. Данилов, И.Б. Енчевич, Е.И. Розанов, Т.Н. Томилина, А.В. Шестов. Управление синхротроном на 880 Мэв и синхронизация с ним экспериментальных установок. Препринт ОИЯИ 2136, Дубна (1985).

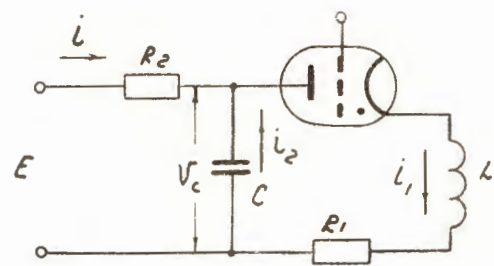
Рукопись поступила в издательский отдел
17 июля 1985 г.



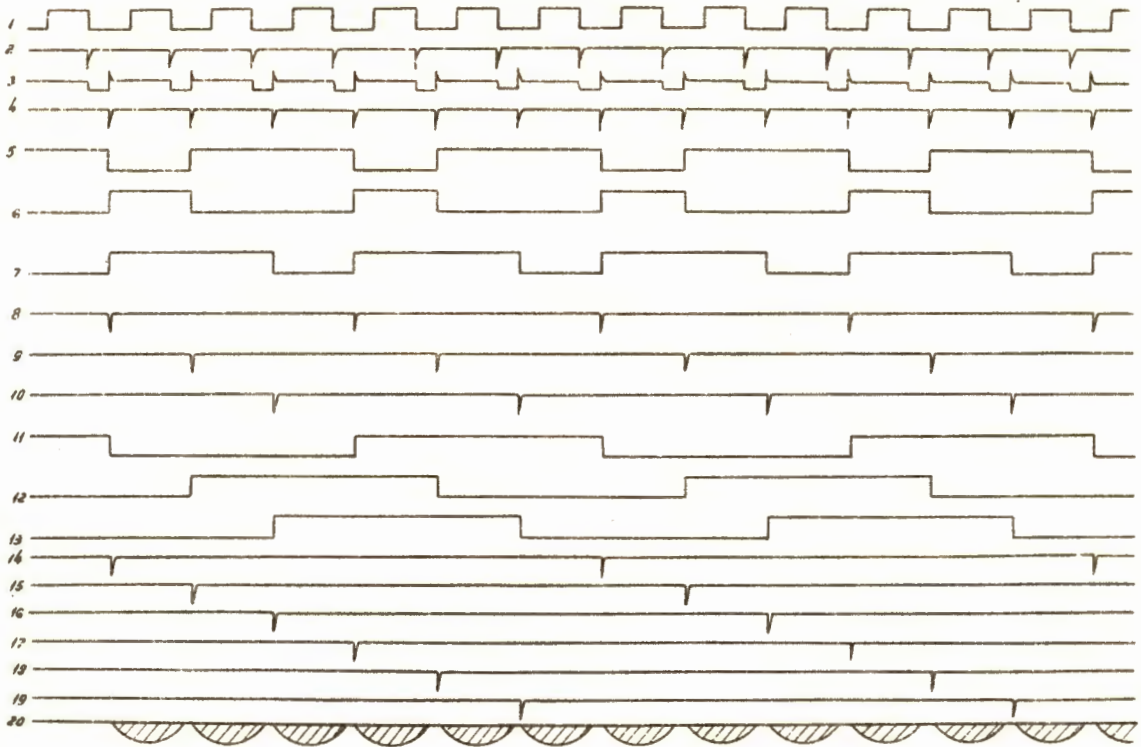
Р и с. 1.



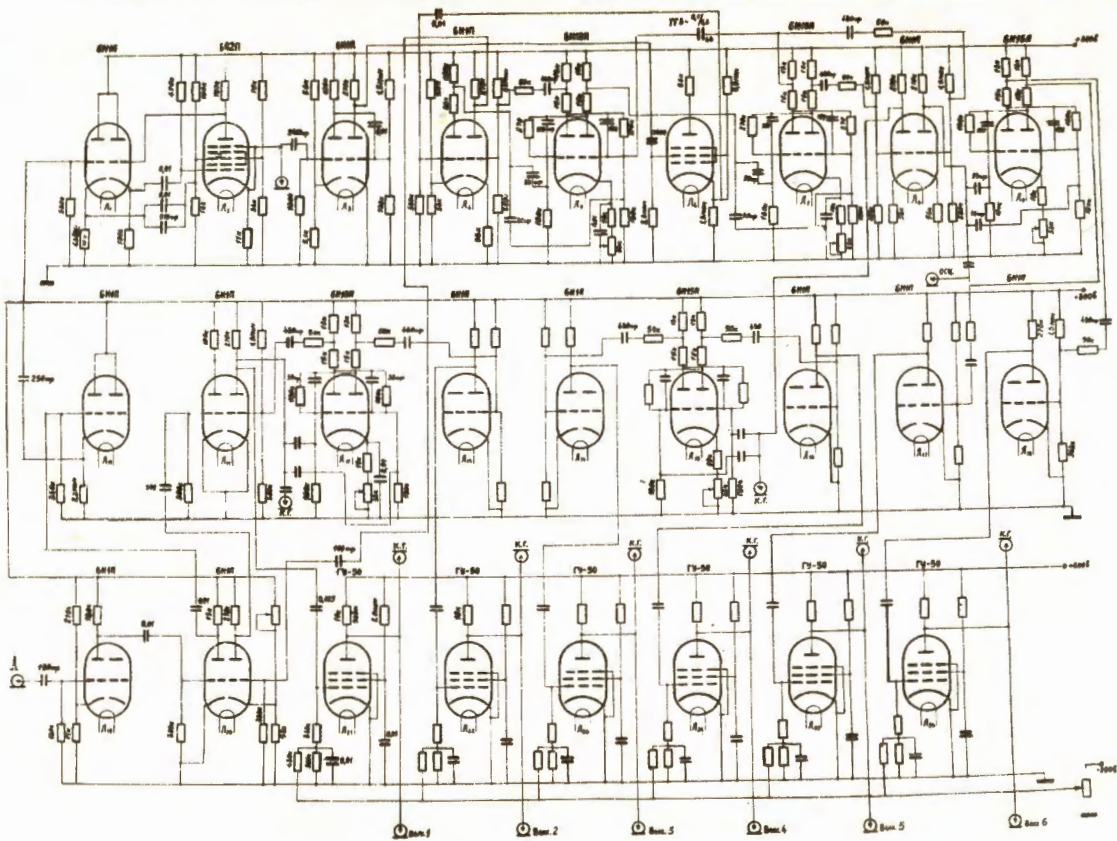
Р и с. 2.



Р и с. 3.



Р и с. 6.



Р и с. 7.

