

препринт 51

В.Б.Залманзон

**Мощные в.ч. генераторы для
физических исследований**

НОВОСИБИРСК 1966

МОЩНЫЕ В.Ч. ГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассматривается мощное высокочастотное оборудование, необходимое для ускорителей частиц высоких энергий. Дается общая характеристика аппаратуры, устанавливаются область применения, требования, специфические особенности каждого типа генераторов. Кратко рассматриваются также в.ч. установки для исследования управляемых термоядерных реакций.

Современная экспериментальная физика потребовала создания специального мощного высокочастотного оборудования. Такое оборудование используется, прежде всего, в ускорителях частиц высоких энергий и установках по исследованию управляемых термоядерных реакций.

В ускорителях мощная радиотехническая аппаратура необходима для передачи энергии потоку заряженных частиц. В установках термоядерного синтеза в.ч. поле используется для решения двух проблем - нагрева плазмы и удержания ее в нагретом состоянии от соприкосновения со стенками сосуда, а в последнее время и для стабилизации ее положения.

В данной статье основное внимание уделено генераторам для ускорителей.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Мощные в.ч. генераторы для экспериментальной физики целесообразно разбить на два класса - работающие на фиксированной частоте и работающие с автоматической перестройкой за время цикла ускорения. Генераторы с фиксированной частотой в свою очередь могут быть как непрерывного, так и импульсного действия.

Генераторы с автоматической перестройкой используются в циклических ускорителях с переменной частотой обращения частиц. В остальных случаях применяются генераторы с фиксированной частотой.

Диапазон используемых частот весьма широк - от сотен килогерц до нескольких тысяч мегагерц. Для некоторых установок требуемая мощность в непрерывном режиме доходит до нескольких мегаватт, в импульсном - до десятков и сотен мегаватт при длительности импульса до десятков и сотен миллисекунд. Следует отметить, что для термоядерного оборудования требуется высокочастотная энергия в импульсе, как правило, на 1-2 порядка больше, чем для ускорителей, работающих в том же диапазоне частот.

В таблице рис. I приведена классификация генераторов по диапазонам

частот. Эта классификация, конечно, в значительной степени условна и временна, т.к. техника экспериментальной физики непрерывно развивается.

Рассмотрим некоторые общие требования к генераторам для ускорителей и отдельные особенности их построения. Для генераторов термоядерных установок такие требования сформулировать затруднительно.

Задачей генераторов для ускорителей является создание разности потенциалов на т.н. ускоряющих элементах, внутри которых проходит пучок частиц.

Эти элементы, в зависимости от назначения, различны - резонаторы различного типа со стоячей волной, диафрагмированные резонаторы с бегущей волной, ускоряющие элементы емкостного характера - дуанты - экранированные полости с ускоряющим зазором между ними, пролетные трубки. При необходимости перестройки по частоте, применяется, как правило, ферритовое заполнение индуктивности контура.

В.ч. мощность генератора определяется, в основном, потерями в ускоряющей цепи. Следует, однако, отметить, что в последних установках, в связи с увеличением интенсивности пучка /более 10^{11} част/сек/ и добротности ускоряющей системы, становится ощутимым и удельный вес мощности, идущей непосредственно на ускорение пучка. Очевидно, КПД ускоряющих элементов может быть достаточно высоким при работе на фиксированной частоте; в этом случае добротность резонаторов лежит в пределах от 3000 до 40.000.^{х/} КПД становится низким при работе с перестройкой, в этом случае он целиком определяется качеством феррита.^{хх/}

Если ранее для ускорения использовались один или два промежутка, то в последних проектах они исчисляются десятками и сотнями. Увеличение суммарной длины и числа промежутков позволяет снизить необходимую в.ч. мощность.

В большинстве установок амплитуду напряжения на резонаторах сле-

х/ Следует отметить экспериментальные работы со сверхпроводящими резонаторами. Проведенные опыты позволяют считать, что в перспективе в отдельных установках потребляемая в.ч. мощность может быть резко снижена /на макетах получено увеличение добротности до 10^4 раз при температуре 4,2 К/.

хх/ О создании систем с перестройкой без использования феррита - см. раздел VI.

дует поддерживать неизменной с точностью 5-10%, разность фаз между отдельными ускоряющими элементами должна быть не более $20-30^\circ$.^{х/} Однако, иногда от аппаратуры требуется постоянство амплитуды - до 1-2% и даже до 0,1% и разности фаз - до $2^\circ - 5^\circ$. Это приводит к необходимости использовать программирование и автоматические подстройки по амплитуде и фазе.

Высокочастотное питание ускоряющих элементов может быть обеспечено несколькими способами:

а/ каждый резонатор питается от отдельного генератора /имеется общий возбуждатель/,

б/ все резонаторы питаются от одного генератора,

в/ используется несколько генераторов, каждый из которых питает свою группу резонаторов.

В первом случае предъявляются серьезные требования к идентичности трактов и систем автоподстройки. Во втором случае необходимо развязать нагрузки и, кроме того, может потребоваться применение систем сложения на большом уровне мощности. При этом используются мостовые методы и, на см. и дсм диапазонах, ферритовые вентили. Использование общего генератора для питания всех резонаторов предпочтительнее, однако, если за время цикла перекрывается большой диапазон частот, то такое построение системы затруднительно.

Генераторы для физических исследований строятся, как правило, по схеме с независимым возбуждением и только в отдельных установках предусматривается режим с самовозбуждением, - частота при этом определяется высокочастотной ускоряющей системой.

В генераторах с переменной частотой скорость изменения частоты лежит в пределах от 1 Мгц/сек до 100.000 Мгц/сек.

В связи с большой в.ч. мощностью становятся актуальными выбор частоты и хорошая экранировка установок с целью отсутствия помех для навигации и телевидения; тщательная экранировка необходима и для нормальной работы отдельных устройств самого ускорителя.

Специфическим требованием к большинству в.ч. устройств, в связи с опасностью раскачки ускоряемых частиц и оседания их на стенки камеры, является весьма жесткий допуск на паразитную модуляцию в опреде-

х/ Некоторые данные настоящего раздела приведены в статье [40].

ленной области частот. Допуск на отклонение амплитуды доходит до 10^{-5} , на девиацию частоты - до 10^{-8} , при этом минимальное абсолютное значение достигает сотых долей герца. В радиофизической аппаратуре непрерывного действия, работающей в коротковолновом и ультракоротковолновом диапазонах волн, используются мощные генераторные лампы, выпускаемые и разрабатываемые в широком ассортименте для радиопередающих устройств.

Карбидированный торированный катод этих ламп разрешает получить импульсный ток, значительно больший, чем ток, необходимый для непрерывной работы в номинальном режиме. Ограничение в работе лампы происходит по анодному напряжению и по рассеянию на сетке. Для режима длинных импульсов /свыше 100 микросекунд/ большой мощности нужны лампы с мощным катодом, высоким анодным напряжением и анодом, допускающим относительно малое рассеивание мощности. Поэтому для создания импульсных генераторов для физических исследований проводятся испытания имеющихся ламп при повышенном анодном напряжении и большой длительности импульса, и разработка специальных ламп.

При использовании импульсных ламп с большим потреблением по накалу и при работе с большой скважностью, кпд анодной цепи мало влияет на общий кпд генератора. Однако и общий кпд в.ч. системы имеет решающее значение только в линейных ускорителях. В ускорителях же с магнитным полем /при интенсивности пучка до 10^{11} част/сек/ общий кпд установки несущественно зависит от кпд в.ч. генератора.

Надежность работы в.ч. устройств играет особую важную роль, т.к. во время работы, а зачастую и спустя значительное время после выключения установки, доступ к ряду элементов в.ч. аппаратуры невозможен. Оборудование, как правило, должно быть рассчитано на круглосуточную работу.

Для физического эксперимента используются следующие установки мощного радиотехнического оборудования:

- 1/ импульсные свч генераторы,
- 2/ импульсные укв - дцв генераторы,
- 3/ кв генераторы непрерывного действия,
- 4/ импульсные кв генераторы,
- 5/ генераторы с автоматической перестройкой,
- 6/ импульсные модуляторы.

В последующих разделах они рассматриваются в изложенном порядке. При этом необходимо отметить следующее. Построение тракта кв генераторов непрерывного действия, являясь серьезной задачей, в то же вре-

мя во многом аналогично построению в.ч. тракта кв передатчиков. К импульсным кв генераторам предъявляются менее жесткие требования, чем к укв-дцв импульсным установкам.

Ниже приводятся краткие характеристики кв генераторов того и другого типов, а также свч аппаратуры.

Несколько подробнее рассматриваются импульсные укв-дцв генераторы, генераторы с перестройкой и модуляционные устройства.

II. ИМПУЛЬСНЫЕ СВЧ ГЕНЕРАТОРЫ

Основное назначение генераторов этого типа - питание электронных линейных ускорителей /ЭЛУ/. В последние годы импульсные СВЧ генераторы используются также в микротронах, для исследования радиационных методов ускорения и в установках термоядерного синтеза для удержания и стабилизации плазмы. Предполагается также и использование свч генераторов в линейных ускорителях протонов.

Генераторы для ЭЛУ создают бегущую волну в диафрагмированном волноводе, работа происходит при сравнительно короткой длительности импульса - несколько микросекунд - и при значительной импульсной мощности - от единиц до сотен мегаватт. Частота следования импульсов - от 50 до 500 импульсов в секунду. Допустимые колебания мощности лежат в пределах от 0,5% до 2-3%. Для коротких ускорителей необходимо обеспечить стабильность частоты порядка 10^{-4} , для больших /длинных/ ускорителей - 10^{-5} .

На выходе генераторов для ускорителей на большие энергии с жесткими требованиями к энергетическому спектру частиц, используются клистроны 10 см. диапазона. Для малых /коротких/ ускорителей достаточно иметь один генератор и, схема, как правило, строится на магнетроне.

При построении в.ч. тракта следует применять генераторы с максимальной мощностью в единице. Нагрузка пучком незначительно усложняет в.ч. генератор ускорителя на сверхбольшие энергии и существенно отражается на построении генератора для ускорителя малой энергии. Для ЭЛУ на большие энергии наиболее целесообразным является независимое питание каждой секции или группы из двух-четырех секций от своего усилителя /рис.2/; при этом уменьшается время установления процесса.

С точки зрения использования длительности в.ч. импульса, желательно возбуждать клистроны последовательно во времени. Обычно длительность полезной части импульса на 0,7 - 1,5 мксек меньше длительности в.ч. импульса.

В связи с малой величиной допустимой паразитной модуляции следует

отметить, что в клистронах девиация частоты определяется в основном неравномерностью модулирующего импульса (модуляция амплитуды на 1% вызывает сдвиг фазы порядка 10^6):

Данные некоторых ускорителей на большие энергии приведены в таблице рис.3.

Остановимся на трактах возбуждения оконечного усилителя. Возбудитель мощного клистрона должен отдавать мощность от 2-х до 15-ти квт. Требования к нему по стабильности частоты и колебанию мощности несколько выше, чем для всего генератора.

Типовой возбудитель имеет задающий генератор с кварцевой стабилизацией; умножительные и усилительные каскады построены на триодах ГИ 70Б; аппаратура содержит систему стабилизации мощности и измерительный комплекс. Блок-схема возбудителя приведена на рис. 4; на этом же рисунке развернута схема стабилизации мощности.

Основные параметры аппаратуры:

Два выхода - 15 и 30 квт.

Частота - 2800 ± 10 Мгц.

Длительность импульса - 3,5 мксек.

Количество импульсов/сек - 50.

Стабильность частоты - 10^{-5} .

Время отработки системы стабилизации мощности - 1-2 сек.

Стабильность мощности при выключенной системе стабилизации $\pm 2\%$

Стабильность мощности с системой стабилизации - $\pm 0,5\%$.

Аппаратура размещается в шкафу габаритами 156x190x78 см.

Для установок термоядерного синтеза в резонаторе создается стоячая волна, поле которой давит на плазму. Пока используются схемы с самовозбуждением на магнетроне с импульсной мощностью в несколько Мгвт при длительности импульса до 1 мсек в диапазоне 10-20 см. Во время импульса происходит резкое изменение нагрузки генератора.

В перспективе ЭЛУ имеют тенденцию к повышению энергии и интенсивности и переходу к более длинным волнам и большей длительности импульса. Если ускоритель Марк-111 /1954 г./ обеспечивает на выходе пучок с энергией 1 Гэв при 60 имп/сек и средней мощности пучка 1 квт, то Стенфордский ускоритель строится соответственно на 48 Гэв, 360 имп/сек, 2,4 Мгвт.

Необходимо отметить, что использование СВЧ генераторов на большую длительность импульса возможно найдет применение и при создании линейных ускорителей протонов, - в одном из зарубежных проектов рассматривается создание 50 Мгвт генератора на частоте 1200 Мгц при длительности импульса 2 мсек.

Для работ в области термоядерного синтеза может потребоваться разработка приборов в дециметровом диапазоне мощностью до 10 Мгвт при

большой длительности импульса. Здесь могут найти применение магнетроны и платинотроны. При разработке радиотехнической аппаратуры для т.я. исследований большие трудности возникают в связи с неясностью параметров нагрузки и резкими их изменениями во время импульса.

III. ИМПУЛЬСНЫЕ УКВ-ДЦВ ГЕНЕРАТОРЫ

Импульсные генераторы в диапазоне 0,5-4 метра используются, главным образом, в протонных линейных и электронных кольцевых ускорителях /см.рис.5 и 6/. Находят они применение и в некоторых других установках, например, в сепараторе для получения "чистых" пучков, сильноточных импульсных ускорителях электронов.

В дальнейшем возможно использование укв генераторов и для нагрева и удержания плазмы.

Работа генератора ведется на фиксированной волне, однако, для первоначальной настройки ускорителя обеспечивается небольшое, порядка 1%, перекрытие по частоте. В некоторых случаях осуществляется небольшая модуляция по частоте (например, 6% девиация в генераторе сильноточного синхротрона БЗМ Института Ядерной Физики Сибирского отделения АН СССР). Мощность различных устройств лежит в пределах от одного до десятков мегаватт при средней мощности до 3-5 мвт /на один генератор до 500 квт/, при длительности импульса от 200 мксек до 10 мсек и частоте их следования до нескольких десятков в секунду. При энергии больше 50 Мэв на выходе размещается от нескольких до двадцати и более резонаторов с большой добротностью, в.ч. напряжение на которых должно быть определенным образом сфазировано. В резонаторах развивается значительная напряженность поля - до 10^7 в/м. Нагрузка за время импульса меняется, иногда в очень широких пределах как по активной, так и по реактивной составляющим. Подгрузка пучком начинается после окончания устанавливающегося процесса в резонаторе, т.е. спустя ¹⁵⁰ мксек.

Для некоторых установок необходимо стабилизировать амплитуду напряжения на постоянном уровне с точностью до 0,5%, в других устройствах требуется обеспечить рост напряжения за время импульса в 10-20 раз. В сильноточных импульсных электронных ускорителях наоборот, - после накопления энергии в резонаторе, происходит полная или частичная передача ее пучку за короткое время /от нескольких наносекунд до микросекунды/. В этом случае стабилизация уровня в.ч. напряжения заменяется системой сравнения части нарастающей амплитуды этого напряжения с эталонным напряжением и выработкой сигнала впуска частиц.

Необходимость поддержания настройки резонатора, разности фаз, определенной формы импульса заставляют вводить, в той или иной мере, системы автоматических подстроек по частоте, фазе, амплитуде, а также программирование.

Как правило, резонаторы не имеют связи друг с другом по электромагнитному полю, поэтому число точек питания ускоряющей системы равно числу резонаторов. Следует отметить, что в одной из последних установок кольцевого типа резонаторы связаны друг с другом так, что передатчик к ним относительно невысокой мощности, на частоте 475 Мгц, происходит по одному волноводу.

Вся система в.ч. питания ускорителя состоит из цепочки: генератор - линия - высокооборотный резонатор. В такой системе автогенераторы из-за ряда недостатков /усложнение схемы из-за возможности самовозбуждения на паразитных частотах, малая скорость нарастания колебаний/ применяются редко и то лишь при одном резонаторе. В последних же установках, при нескольких резонаторах, используются генераторы независимого возбуждения с общим задающим генератором.

На рис. 7 показаны различные блок-схемы тракта высокой частоты.

Схема "а" обладает достоинством в смысле локальности каждого генератора; однако, при этом предъявляются повышенные требования к идентичности отдельных трактов и к системам автоподстройки. В этом отношении схема "б" предпочтительнее, т.к. в случае ее использования сказывается нестабильность фазы не всего тракта в.ч. генератора, а только конечных каскадов, которая при надлежащей стабилизации питающих напряжений не превышает $1^{\circ} - 2^{\circ}$. Обе схемы, в основном, применяются при большой в.ч. мощности, когда получить необходимую мощность от одной лампы затруднительно. В аппаратуре по схеме "б" выходные каскады целесообразно размещать непосредственно на резонаторах. Эта схема особенно удобна при линейном расположении резонаторов большой длины, так как при этом канализация в.ч. энергии происходит на сравнительно малом уровне. По сравнению со схемами "в" и "г", схема "б" должна обеспечивать большую надежность работы конечных каскадов. Схемы "в" и "г" более прогрессивны. Однако, использование их наиболее рационально при сравнительно небольшой мощности, потребляемой резонаторами и относительно короткой волне. При недостаточной мощности конечных ламп в в.ч. генераторе, ообранном по этим схемам, применяется сложение мощностей отдельных трактов или параллельная работа ламп, что усложняет схему генератора.

Мостовые схемы распределения мощности являются надежным средством построения системы с большим числом резонаторов. В последнее время используются и ферритовые элементы на большие длительности /например, Кембриджский ускоритель электронов на 7 Гэв/, которые позволяют осуществить развязку между генераторами и обеспечить их согласование с нагрузкой, что особенно ценно при плохом КВВ нагрузки.

Оптимальный вариант построения ускорителя в значительной степени определяется возможностью осуществления того или иного тракта высокой частоты.

По схеме "а" построены, например, генераторы для инжектора ускорителя на 7 Гэв ИТЭФ, по схеме "б" спроектированы в.ч. установки линейных ускорителей протонов ЦЕРН "а" и Серпухова, по схеме "в" разработан в.ч. аппарат для Ереванского кольцевого ускорителя электронов, по схеме "г" изготовлен генератор Кембриджского синхротрона.

Для иллюстрации построения тракта у.ч. импульсного генератора на рис.8 приведена блок-схема генератора для антипротонного канала синхрофазотрона в Дубне.

Основные данные генератора:

мощность в импульсе - 1,5 Мвт,
длительность импульса - 6 мсек,
частота - 150 Мгц,
нагрузка - 16 резонаторов,
разность фаз между соседними резонаторами - $147,5^{\circ}$,
точность установки фазы - $\pm 1^{\circ}$.

Состав аппаратуры:

1. Стойка предварительного усиления /выходная импульсная мощность 600 ватт/ с блоком защиты фидерной системы от перенапряжений и блоком автоматической регулировки напряжения /АРА/ на главном фидере.
2. Усилитель мощности.
3. Фидерная система с системой деления и фазовращателями, установленными в фидерах, идущих к резонаторам.
4. Стойка фазовых мостов.
5. Модулятор.
6. Шкаф питания.
7. Селеновый выпрямитель на 50 кв.
8. Пульт управления.
9. Измерительная стойка.

При предварительной регулировке генератора вместо резонаторов включаются эквиваленты нагрузок. Во всех фидерах установлены направленные ответвители, которые являются датчиками для измерения фаз, амплитуд напряжения, коэффициента бегущей волны, а также защиты от перенапряжений и автоматической регулировки напряжения. Фазовые мосты служат для измерения сдвига фаз в данном фидере относительно первой ветви. Блок защиты вырабатывает импульс, запирающий модулятор при перенапряжении на фидере. В блоке АРА вырабатывается сигнал ошибки, меняющий коэффициент усиления конечного каскада предварительного усилителя. Для измерения напряжений используются осциллографы и специаль-

ные импульсные вольтметры.

Рассмотрим отдельные вопросы построения тракта высокой частоты.

Стабилизация фаз и амплитуд

Допуски на нестабильность фаз и амплитуд полей в резонаторах обуславливаются допустимыми потерями частиц и лежат, как уже указывалось, для фаз в пределах 2° - 5° , амплитуд - 1% для системы из резонаторов с несколькими ускоряющими зазорами и в несколько больших пределах для ускорителя с однозазорными резонаторами. Причинами изменения фаз и амплитуд являются [15]:

а/ температурный уход настройки резонатора, который вызывает для резонатора из меди уход фаз порядка $60^{\circ}/^{\circ}\text{C}$ при добротности 50.000 /при этом появляются и колебания напряжения/,

б/ температурный уход длины фидера, что вызывает смещение фазы не более 2° при длине фидера менее 10 длин волн,

в/ большая взаимосвязь генератора и резонатора при сильной нагрузке пучком; при этом резонатор как нагрузка определяется и режимом генератора. В этом случае оконечные каскады необходимо ставить в перенапряженный режим. Для создания активного входного сопротивления резонатора, он должен быть несколько расстроен относительно частоты генератора,

г/ изменение режима генератора, смена ламп в тракте. Например, изменение анодного напряжения оконечных каскадов на 20% вызывает изменение входного сопротивления лампы и в результате изменение фазы до 10° .

Таким образом, основной причиной флюктуации фазы является температурный уход настройки резонатора. При достаточной стабильности питающих напряжений нестабильность фаз в мощных каскадах имеет допустимую величину и поэтому можно использовать схему "б"; уменьшение, по сравнению со схемой "а", числа каскадов уменьшает также и возможное изменение фазы.

В общем случае необходимо иметь 2 подстройки по фазе - частоты резонатора и фазы в тракте генератора. Но в схеме "б", благодаря малому колебанию фазы в оконечных каскадах, используется одна система - подстройка частоты /фазы/ в резонаторе сравнением с фазой на входе оконечной лампы. По такой схеме /см. выше/ построены генераторы линейных ускорителей ЦЕРН"а и Серпухова. В генераторе Серпуховского ускорителя флюктуация фазы не превышает 3° . Введение в этой

установке стабилизации питающих напряжений позволило ограничиться применением электронно-механической системы авторегулирования, устраняющей медленные уходы фазы. Такая же возможность предусмотрена в каждом канале генератора антипротонного канала в Дубне.

Поддержание постоянства амплитуды также достигается стабилизацией питающих напряжений и введением автоматического регулирования. В генераторах ускорителей ЦЕРН"а и Серпухова напряжение накала поддерживается с точностью 0,5%, зарядное напряжение - с точностью 0,1-0,2%.

При автоматической регулировке управляющий сигнал воздействует либо на возбуждение одного из маломощных каскадов, либо на амплитуду модулирующего импульса. Первый способ применен /точность 0,5%/ в установке антипротонного канала, второй способ использован /точность того же порядка/ в генераторе линейного Аргоннского ускорителя протонов.

Наряду с системами автоматического регулирования используется также программное управление амплитудой /генераторы Аргоннского^х и Ереванского ускорителей/ и фазой /Ереванский ускоритель/. Программное управление позволяет также провести коррекцию формы в.ч. импульса с целью устранения мультипакторного эффекта и влияния тока пучка /аппаратура ускорителей в Серпухове и Аргонне/. В генераторе Серпуховского ускорителя 15% спад в.ч. поля за время импульса тока /12 мксек/ корректируется форсированием режима генератора.

Следует отметить особенность систем авторегулирования в.ч. установки Ереванского синхротрона. Поскольку ускоряющий эффект определяется интегральной напряженностью поля во всех 24 резонаторах, управляющими сигналами систем автоматических регулировок амплитуды и фазы выбраны, соответственно, сигналы, пропорциональные алгебраическим суммам отклонений амплитуд напряжений и их фаз от опорных значений. Наличие системы автоматической подстройки фазы в данном случае особенно важно в связи со стремлением ухода фазы из-за изменения характера нагрузки и режима каскадов тракта, вызванных значительным ростом напряжения во время импульса. Использование замкнутых систем авторегулирования совместно с программным управлением значительно облегчает получение необходимого закона изменения ускоряющих напряжений.

Лампы

Когда для экспериментальной физики потребовалось создание импульс-

^х/ На первом этапе, в последующем была введена автоматическая регулировка.

ных УКВ генераторов мощностью свыше 1 Мвт при длинном импульсе, прежде всего были исследованы в импульсном режиме мощные генераторные триоды непрерывного действия ГУ23А, ГУ4А, ГУ30А и ГУ10А [17]. При этом были получены мощности, значительно превышающие номинальные, и ряд ламп непрерывного действия используется в аппаратуре в импульсных режимах.

На основе этих исследований были разработаны мощные импульсные триоды ГИ-4А, ГИ-24А и ГИ-27А. Они позволили построить импульсные установки значительной мощности на частотах порядка 150 Мгц /1,2 Мвт при длительности импульса 0,8 мсек - на ГИ-4А, 1,5 Мвт при длительности импульса 6 мск - на 2-х ГИ-24А, 5 Мвт при длительности импульса 0,3 мск - на ГИ-27А/.

Следует подчеркнуть, что даже специально разработанные лампы часто приходится использовать при импульсе с длительностью, превышающей номинальное значение.

В промежуточных каскадах могут использоваться те же выходные лампы, что даст некоторые преимущества - однотипность ламп и повышение коэффициента усиления; могут использоваться и лампы непрерывного действия, поставленные в импульсный режим или специальные импульсные лампы, например, ГИ-35Б /максимальная частота - 250 Мгц, выходная мощность 250 квт при длительности импульса 80 мсек и 70 квт при длительности импульса 3 мск/.

В таблице рис.9 приведены результаты испытаний в импульсном режиме ламп непрерывного действия ГИ5А и ГУ49А и данные специально разработанных импульсных ламп.

В таблице рис.10 помещены параметры ряда зарубежных ламп.

Отдельные элементы

Параллельная работа ламп вызывает, особенно в укв диапазоне, известные трудности. Однако, в генераторе Ереванского ускорителя удалось осуществить каскад на трех параллельно включенных лампах ГИ-24А с мощностью порядка 300 квт при скважности 7 на частоте 140 Мгц. Конструкция анодно-сеточного контура этого каскада обеспечивает строгую геометрическую и электрическую симметрию, благодаря чему исключено появление иных типов колебаний, возникновение которых возможно из-за больших поперечных размеров системы. Контур выполнен в виде нерегулярной коаксиальной линии с переменным волновым сопротивлением.

Конструкция сеточно-катодной цепи обеспечивает строгую синфазность возбуждения в.ч. напряжений.

На частотах, вплоть до 150-200 Мгц, на мощных лампах удается строить каскады с четвертьволновыми контурами, что улучшает устойчивость и полосовые свойства генератора. При этом на лампе ГИ-24А достигнута предельная частота 170 Мгц при уровне мощности 1 Мвт.

В межкаскадных цепях используются коаксиальные разомкнутые шлейфы, а также бесфидерное сочленение каскадов, что также приводит к улучшению указанных характеристик.

В межкаскадных цепях находят применение и гибкие полиэтиленовые кабели до уровней мощности 1 Мвт.

На базе сопротивлений типа УНУ оказалось возможным создать малогабаритные широкополосные эквиваленты в.ч. нагрузок на частоты до 150 Мгц, мощностью до 100 квт при длительности импульса до 6 мск.

Увеличение энергии и интенсивности пучка, появление некоторых новых направлений в физике ускорителей приводят к необходимости разработки нового высокочастотного оборудования, причем основными проблемами являются увеличение суммарной мощности на установку до 50-100 Мвт и средней мощности до 3-5 Мвт при длительности импульса до 10 мск, освоение диапазона до 1000 Мгц и увеличение мощности отдельного генератора. Например, уже сейчас в Брукхавене проектируется 50 Мвт-ный импульсный генератор на частоты 200, 400 или 1200 Мгц^х/вариант не устанавлен/ при средней мощности 3 Мвт. Развитие в.ч. термоядерных установок также ставит задачу увеличения мощности до указанных величин на частотах до 300 Мгц при большой длительности импульса.

IV. КВ ГЕНЕРАТОРЫ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Коротковолновые генераторы непрерывного действия используются в классических циклотронах, циклотронах с переменной энергией частиц, в установках со встречными пучками /накопительных системах/. Известно также применение таких генераторов в линейном ускорителе на большие токи /Ливермор, США/.

Особое внимание к построению КВ генераторов непрерывного действия приковано в последние годы в связи с созданием циклотронов на большие

^х/См. стр. 6.

энергии и токи - так называемых "мезонных фабрик".

Работа в.ч. устройства, как правило, происходит на одной частоте в диапазоне 3-50 Мгц. В отдельных случаях используются более высокие частоты (установка встречных электронных пучков ВЭП-1 Института Ядерной Физики Сибирского отделения АН СССР). Иногда требуется обеспечить возможность неоперативной перестройки. Только в циклотронах с переменной энергией необходима оперативная перестройка на ряд заранее известных частот.

Мощность различных установок лежит в пределах от сотен до тысяч киловатт.

Нагрузкой генератора служит одна или несколько колебательных систем с большой, свыше нескольких тысяч, добротностью. Загрузка пучком обычно мала и только в отдельных случаях сравнима с величиной потерь в самой системе.

В некоторых установках амплитуда напряжения должна поддерживаться с точностью до 0,1%, разброс фаз между резонаторами допустим в пределах нескольких градусов. При наладочных режимах и тренировке часто применяется импульсная работа /манипуляция вниз/ при длительности импульса до 2 мсек.

Нагрузка в большинстве случаев подключается через экранированный фидер; иногда оконечный каскад совмещается с колебательной системой.

В.ч. генераторы непрерывного действия обычно строятся по схеме с независимым возбуждением. При этом большие преимущества дает использование отдельных схем типовых в.ч. генераторов кв передатчиков.

Иногда применяется режим автоколебаний с подачей возбуждения с нагрузки на предварительные каскады. Однокаскадная схема с самовозбуждением немного экономичнее, чем схема с независимым возбуждением, но менее надежна. Кроме того, и при схеме автогенерации необходим дополнительный тракт с независимым возбуждением для работы в режиме откачки и тренировки вакуума колебательной системы.

В отечественных циклотронах с диаметром полюсов 120 см и 150 см используются генераторы с независимым возбуждением. В этих генераторах предусматривается также режим кругового самовозбуждения.

За рубежом в некоторых циклотронах, предназначенных, в основном, для промышленных целей /производство изотопов и др./, установлены генераторы с самовозбуждением.

Изменение амплитуды выходного напряжения осуществляется регулировкой возбуждения или анодного напряжения.

В некоторых установках изменение загрузки генератора может привести к изменению амплитуды. Колебание амплитуды может быть вызвано и небольшими изменениями режима в.ч. тракта. Поэтому часто генератор охвачен дифференциальной обратной связью по огибающей, обеспечивающей также подавление фоновых составляющих. При этом изменение опорного напряжения позволяет вводить в случае необходимости динамическую регулировку амплитуды. Для поддержания амплитуды используется и регулировка напряжения анодного питания /циклотрон в Ок-Ридже/.

При больших мощностях может быть использовано сложение мощностей отдельных трактов непосредственно в нагрузке.

Требование к идентичности фазовых характеристик, определяемое эффективностью суммирования, заставляет иногда применять автоматическую регулировку фазы.

В связи с большой актуальностью создания ускорителей на энергии до 1 Гэв при большом токе в настоящее время в лаборатории Ядерных Проблем ОИЯИ разрабатывается релятивистский циклотрон на энергию 700 Мэв с током пучка протонов до 500 мка.

Проект мощного кв генератора непрерывного действия для этого циклотрона предусматривает создание двух в.ч. трактов по 2 Мвт каждый, работающих на частоте 12 Мгц.

Особое внимание при проектировании уделено построению мощных каскадов и канализации в.ч. энергии, а также силовой аппаратуре. Оконечные каскады должны быть размещены в необслуживаемом помещении на расстоянии 150-200 метров от предварительного тракта рассчитанного на мощность 400-500 квт. Предусматривается использование мостовой схемы сложения мощностей отдельных выходных блоков. Согласно проекту нагрузка и шесть последних каскадов охвачены системой АРА по огибающей, что позволило создать удобную схему защиты от пробоев в в.ч. тракте и облегчить требования к фильтрации источников питания, при ожидаемой нестабильности в.ч. напряжения на нагрузке менее 1%. Все помещения в.ч. тракта должны быть экранированы и снабжены фильтрами помех.

Создание сильноточных линейных ускорителей и циклотронов с пространственной вариацией /вплоть до энергий в 15 Гэв/ требует дальнейшего увеличения мощности в.ч. оборудования.

Рост энергетики в.ч. установок и ее удельного веса в энергетике ускорителя выдвигают серьезные проблемы увеличения коэффициента полезного действия, коэффициента усиления ламп по мощности, разработки более мощных ламп, разработки систем сложения мощности. Оконечные каскады работают в условиях большой вредности и желательно их обслуживание дистанционными методами.

У. ИМПУЛЬСНЫЕ КВ ГЕНЕРАТОРЫ

Импульсные кв генераторы используются, в основном, в установках для в.ч. нагрева плазмы и в исследованиях по ее удержанию магнитным полем /в некоторых случаях генераторы этого типа применяются в сильноточных импульсных ускорителях электронов, например, в Импульсном линейном ускорителе Института Ядерной Физики Сибирского Отделения АН СССР/. При этом требуются значительные мощности - до 50-100 Мгвт при длительности импульса доходящей до нескольких мсек. Работа происходит на одной частоте; однако, часто предусматривается возможность неоперативной перестройки в широком диапазоне частот.

Иногда нагрузкой генератора является контур с низким переменным волновым сопротивлением. Параметры нагрузки ориентировочны. При работе на малую индуктивность возникает необычная проблема создания контура с очень большой емкостью. При этом конструкция конденсатора должна обеспечивать малую собственную индуктивность и приемлемое термораспределение.

В ряде случаев необходим комплекс из нескольких генераторов, работающих на сильно связанные системы.

В связи с начальным состоянием исследования плазмы с помощью в.ч. энергии, параметры генераторов ориентировочны и берутся с запасом.

Импульсные кв генераторы строятся с самовозбуждением и с независимым возбуждением. При создании таких установок могут быть использованы мощные триоды ГК5А, ГИ26А, ГУ49А. Лампа ГК-5А обеспечивает 5 Мгвт при длительности импульса до 600 мксек, лампа ГУ49А отдает 7 Мгвт при длинном импульсе; от ГИ 26А в диапазоне до 30 Мгц возможно получить до 3 Мгвт при импульсе длительностью 5 мсек, на частоте 2 Мгц эта лампа обеспечивает 8 Мгвт при импульсе длительностью 600 мксек; - часто используется параллельное включение ламп. Для создания большой импульсной мощности возможно использовать и прямой колебательный разряд большой емкости с высокой добротностью.

У1. ГЕНЕРАТОРЫ С ПЕРЕСТРОЙКОЙ

Генераторы с перестройкой используются во всех кольцевых ускорителях, где происходит изменение скорости движения частиц - в протонных синхротронах /см. рис. II/, электронных синхротронах с малой энергией инжекции, обычных и кольцевых фазотронах. Мощность каждого

генератора лежит в пределах от единиц до сотен киловатт. Диапазон используемых частот - от сотен килогерц до десятков мегагерц.

Работа происходит циклами, длительностью от нескольких миллисекунд до нескольких секунд, с частотой повторения от нескольких раз в минуту до 50-ти раз в секунду. Характерной чертой этой группы установок является большое, иногда до 10-15 раз, перекрытие по частоте. Скорость изменения частоты всегда максимальна в начале цикла, ее величина колеблется в широких пределах - от сравнительно малого значения - нескольких Мгц/сек при длинном цикле, до 100.000 Мгц/сек при коротком цикле.

К выходному сигналу предъявляются очень жесткие требования по отсутствию амплитудной и частотной микромодуляции в определенном спектре частот модуляции.

Нагрузкой генератора /ускоряющим элементом/ является, как правило, коаксиальный резонатор длиной менее четверти волны или короткая пролетная трубка. Полный центральный проводник резонатора окружает вакуумную камеру, зазор на разомкнутом конце служит ускоряющим промежутком. Короткая пролетная трубка из проводящего материала размещается в разрезе заземленной камеры и изолируется от нее керамическими вставками. Напряжение, приложенное между трубкой и камерой, действует на частицы дважды - при входе и выходе из трубки.

В различных установках используется от одного до нескольких десятков ускоряющих элементов.

Неравномерность амплитудной характеристики допускается, обычно, в пределах $\pm 5\%$ /аппаратура для Серпуховского ускорителя протонов на 70 Гэв /- $\pm 10\%$ / генераторы для синхрофазотрона на 10 Гэв в Дубне и для ускорителя протонов на 7 Гэв в ИТЭФ /, однако, к некоторым, установкам предъявляются более жесткие требования - до $\pm 0,5\%$. Разность фаз напряжений отдельных ускоряющих элементов должна лежать в пределах 10^0-30^0 во всем диапазоне частот.

Для выполнения этих требований используются программирование и автоматические регулировки по амплитуде, фазе, частоте напряжения.

Емкость резонатора /зазор, лампа, монтаж/, как правило, меньше емкости пролетной трубки. Резонатор можно рассматривать как сосредоточенную индуктивность, трубку - как емкость.

Питание ускоряющих элементов /осуществляемое стоячей волной/ может проводиться как по аперидической, так и по резонансной схе-

мам усиления.

В первом случае ускоряющий элемент входит в полосовой фильтр. При использовании в этой схеме пролетной трубки, максимум реактивной мощности имеет место на высоких частотах, при использовании резонатора - на низких частотах.

Во втором случае элементом перестройки является подмагничиваемый феррит /иногда в совокупности с переменной емкостью, например в генераторе ускорителя протонов "Сатурн"/, заполняющий резонатор или индуктивность, включенную параллельно пролетной трубке. В такой контуре с неизменной емкостью, реактивная мощность достигает наибольшей величины на высоких частотах. Необходимая при этом в.ч. мощность генератора определяется, в основном, потерями в феррите и лишь частично энергией, передаваемой пучку.

Обычно добротность феррита при подмагничивании растет, примерно, пропорционально частоте, так что нагрузка для усилителя сравнительно мало меняется при прохождении диапазона частот. В некоторых случаях рост добротности должен быть ограничен из-за больших скоростей изменения частоты и необходимости передачи через в.ч. тракт информации по управлению пучком.

Преимущества резонансного варианта очевидны - выигрыш по мощности /например, в аппаратуре для ускорителя ИТЭФ на 7 ГэВ - до 30 раз/, сокращение габаритов аппаратуры. Поэтому в большинстве синхрофазотронов используются перестраиваемые резонаторы или пролетные трубки, а при большом перекрытии, совокупность резонаторов и трубок. /Принстон-Пенсильванский ускоритель на 8 ГэВ/.

Определенными недостатками резонансной схемы являются наличие системы управления перестройкой и затрата на эту систему дополнительной мощности питания.

Апериодический вариант конкурентноспособен при относительно малой реактивной мощности или, наоборот, при необходимости создания на ускоряющем промежутке большого напряжения и отсутствии феррита с хорошей динамической добротностью, что может иметь место при очень больших скоростях перестройки. Необходимый в этом случае усилитель большой мощности со сравнительно небольшой полосой должен быть построен по схеме широкополосной коррекции на каскадах с идентичными характеристиками, - распределенное усиление или взаимная расстройка каскадов при этом нецелесообразны.

Возбудитель и тракт предварительного усиления с одним или несколькими широкополосными каскадами обычно располагаются в центральной пультной, генераторы /усилители мощности/ с ускоряющими элементами - по периметру кольца.

Генератор, как правило, состоит из нескольких каскадов широкополосного усиления и окончного каскада, перестраиваемого совместно с нагрузкой /в.ч. генератор ускорителя протонов в Серпухове и ЦЕРН^е/ Иногда устанавливается общий возбудитель значительной мощности, тогда у резонаторов размещаются только окончные каскады /генератор ускорителя протонов в Брукхавене/. Характерные скелетные схемы приведены на рис. 12, 13, 14.

Датчиком автоматической настройки контура выходного каскада является обычно фазовый дискриминатор, включенный между выходом окончного каскада и его входом или входом всего усилителя мощности через линию задержки. Сигнал ошибки воздействует через усилитель постоянного тока /упт/ на систему подмагничивания. Ранее в упт использовались модуляторные лампы, что давало низкий кпд. Применение промежуточной частоты повысило кпд и облегчило борьбу с микромодуляцией. Использование в упт мощных транзисторов обеспечивает работу с еще большим кпд.

Паразитная амплитудная модуляция создается источниками анодного и сеточного питания, а также накалом ламп. Фазовую модуляцию вызывают, главным образом, переменные составляющие в токе подмагничивания и напряжении питания канала автоматической подстройки частоты. Поэтому в аппаратуре применяется высокая фильтрация и питание накала ряда ламп постоянным током.

Вся аппаратура должна быть тщательно экранирована.

Ферриты

Выбор феррита довольно сложен. Требования к нему определяются и конструкцией контура и необходимым перекрытием по частоте и добротностью и скоростью перестройки.

При разработке в.ч. аппаратуры для ускорителей большей частью приходится разрабатывать и новые типы феррита. Так были созданы крупногабаритные цепи ОКС 600 /для синхрофазотрона на 10 ГэВ/, ОКС 800/ для ускорителя ИТЭФ на 7 ГэВ/, 300 НН-П/ для ускорителя на 70 ГэВ/.

Некоторые данные ферритов приведены в таблице рис. II.

Рассмотрим некоторые конструкции с ферритами. Индуктивность для настройки пролетной трубки аппаратуры для синхротрона на 10 Гэв выполнена в виде двух короткозамкнутых отрезков коаксиальных линий с подмагничиванием внутри внутреннего токовода линии. Каждый отрезок длиной 12,5 м разделен на пять частей, расположенных одна над другой и соединенных последовательно. Общий вес феррита 1,6 тн. На начальной частоте 0,18 Мгц добротность равна четырем.

Индуктивность аппаратуры для ускорителя ИТЭФ на 7 Гэв состоит из двух, соединенных параллельно катушек. Каждая катушка образована двумя концентрическими разрезанными вдоль оси с двух сторон трубами со вставленными между ними кольцами размером 125x85x15 мм из феррита ОКС 800. По центру обеих катушек проходит общая для них обмотка подмагничивания. Вес феррита в одной катушке 33 кг. На начальной частоте 0,16 Мгц добротность равна четырем. Эквивалентное сопротивление контура приблизительно постоянно в диапазоне частот 0,68 - 8,5 Мгц.

В аппаратуре для ускорителя на 70 Гэв используются два возбуждаемых противофазно резонатора с общей ускоряющей щелью /см. рис. 15/. Резонаторы заполнены 44 ферритовыми щелями прямоугольной формы марки 300 НН-П с магнитной проницаемостью 300 и добротностью порядка 30 при индукции 75 гс на начальной частоте 2,6 Мгц. Каждая щель состоит из шести брусков размером 200 x 80 x 20 мм³. Вес феррита в каждом ускоряющем элементе 400 кг. Подмагничивание, обеспечивающее перестройку контура до 6,1 Мгц, осуществляется пропусканием тока по специальной обмотке, в конструкции которой предусмотрена ее развязка от высокочастотного поля.

При увеличении скорости перестройки все значительнее проявляется и уменьшение добротности, и запаздывание в установлении частоты настройки контура и амплитуды напряжения на нем. Величина динамической добротности зависит и от размеров феррита.

Эти явления не позволяют в ряде случаев использовать типовые ферриты при больших скоростях перестройки и больших напряжениях на контуре, что приводит к необходимости вести разработку мощных полосовых усилителей.

Подмагничивание феррита может быть обеспечено специальной обмоткой, использованием обмотки высокой частоты или внешним электромагнитом. Уменьшение мощности подмагничивания за счет увеличения числа витков не всегда допустимо, т.к. при этом растет объем и стоимость времени системы. Специальная обмотка подмагничивания должна последовательно охватывать две индуктивности, включенные по пути тока высокой частоты параллельно. В некоторых случаях, при отсутствии ферритов на данные частоты возможно использование материала с большой магнитной проницаемостью и исходным подмагничиванием.

Механическая перестройка

Еще в фазотроне на 680 Мэв /Дубна/ для изменения частоты генератора использован вращающийся переменный конденсатор, т.н. "вариатор". В последние годы все более детально изучается возможность механической перестройки коаксиального резонатора с помощью емкостного плунжера. Ускоряющее напряжение при этом создается в зазоре между плунжером и высоковольтным концом резонатора. Плунжер перемещается электромеханической системой, аналогичной системе электродинамического громкоговорителя. Изготовлен он из алюминия толщиной 0,5 мм, масса его не превышает 200 гр, механические резонансы лежат на частотах выше 6,5 кгц, при частотах повторения до 30 гц механические усилия малы. Ток через управляющую катушку плунжера определяется сигналом от фазового детектора, пропорциональным расстройке резонатора. Такая система позволила спроектировать генератор с перестройкой от 100 до 200 Мгц при изменении ускоряющего зазора от 2 до 17 мм. Добротность резонатора определяется полосой частот механической следящей системы, которая в рассматриваемом случае не превосходит 8,8 кгц. Для того, чтобы расстройка резонатора не превосходила половину его полосы пропускания, добротность резонатора не должна превышать величину, определяемую также и диапазоном изменения скоростей перестройки частоты. Так, для ускорителя на 6 Гэв при инжекции 200 Мэв и частоте повторения 25 гц, $Q = 220$, для ускорителя на 300 Гэв при инжекции 3 Гэв и длительности цикла 3,4 сек, $Q = 10^4$.

Автоматическое регулирование

Системы автоматического регулирования и стабилизации используются для управления амплитудой /стабилизация амплитуды, АРА/, фазой или разностью фаз каналов /АПФ/, а также собственной частотой контура с ферритом /АПЧ/.

В связи с требованием быстрого регулирования используются, как правило, статические системы с электронными управляющими устройствами. Характеристика коэффициента передачи либо плоская, до граничной частоты, либо имеет подъем, 6 дб/окт, в области низких частот, что повышает коэффициент передачи на этих частотах и приближает систему к астатическому управлению.

В ряде случаев, при управлении частотой настройки контура ис-

пользуются комбинированные системы управления - программное управление в сочетании с автоматическим. Применение программного управления позволяет уменьшить коэффициент регулирования и снизить полосу контролируемых частот в области асимптотического спада коэффициента передачи.

В генераторах для синхрофазотронов с АПЧ контура, иногда, представляется возможным объединить систему настройки контура /АПЧ/ и схему стабилизации разности фаз каналов /АПФ/ за счет запаса по усилению и работы системы АРА. В этом случае /например, в аппаратуре ускорителя на 70 Гэв - см. ниже/ работают совместно все три системы.

Совместная работа двух и более систем, в случае узкого диапазона частот, по сравнению с полосой общего элемента их связи /контура/ или большой разницы в полосе регулирования, не встречает принципиальных трудностей.

Для иллюстрации построения генератора с перестройкой, на рис. 14 приведена блок-схема в.ч. аппаратуры одного канала ускорителя протонов на 70 Гэв.

В состав оборудования радиотехнической части ускорителя входят установленные в кольцевом зале 55 резонаторов с в.ч. усилителями. Шкафы с источниками питания размещаются в зданиях проточно-вытяжных центров.

Дистанционное управление и контроль работы всех комплектов производятся с центрального пульта из зала управления.

Напряжение на вход оконечного каскада, нагрузкой которого является резонансный контур /ускоряющий резонатор/, подается от четырехкаскадного широкополосного в.ч. усилителя, построенного по схеме со сложной коррекцией.

Длительность пакета высокочастотного напряжения около 4 сек., пауза - около 3-4 секунд.

Частота в течение импульса нарастает от 2,6 Мгц до 6,068 Мгц.

Наибольшая скорость изменения частоты составляет 160 Мгц/сек.

Амплитуда напряжения на ускоряющем промежутке равна 7-8 кв.

Повторение формы огибающей ускоряющего напряжения с точностью $\pm 5\%$ от огибающей входного сигнала и снижение амплитудной модуляции выходного напряжения частотами 20 ± 5000 гц до допустимых значений $1/5 \cdot 10^{-4}$ обеспечивается специальной системой противосвязи по огибающей /система АРА/. Частотная модуляция в том же диапазоне модулирующих частот не превышает $10,03-10/10^{-7}$.

Для перестройки резонансного контура оконечного каскада в заданном диапазоне частот и поддержания разности фаз между ускоряющими напряжениями резонаторов в пределах 20° применена система АПФ.

За опорную фазу принята фаза входного сигнала, подаваемого на фазовый дискриминатор через линию задержки, запаздывание в которой, примерно равно запаздыванию в широкополосном усилителе.

Широкополосные усилители обеспечивают неискаженное воспроизведение частотной и амплитудной модуляции входного в.ч. напряжения с частотой до 30 кгц.

Источником тока подмагничивания ферритов служит стабилизированный выпрямитель 16в. 100 а., собранный на полупроводниках. Управление током подмагничивания производится усилителем постоянного тока, охваченным отрицательной обратной связью по току.

Мощность, потребляемая каждым каналом от сети, равна, примерно, 23 квт.

В перспективе, в области генераторов с перестройкой наблюдается тенденция перехода к более высоким частотам - до 100 Мгц и даже до 250 Мгц / в.ч. аппаратура кибернетических ускорителей/.

В связи с ростом энергии инжекции наблюдается сокращение величины относительного перекрытия по частоте, однако, скорость ее изменения в связи с повышением частоты, остается в пределах 100.000 Мгц/сек.

Большое внимание уделяется увеличению интенсивности /росту числа циклов/сек и увеличению числа ускоряемых частиц/, что вызывает повышение загрузки генератора пучком.

В перспективе значительный рост числа станций, - уже в проекте кибернетического ускорителя на 6 Гэв принято 800 ускоряющих резонаторов.

Следует считать, что необходимая суммарная мощность будет лежать в пределах от нескольких единиц до 10 ± 15 Мвт.

Таким образом, основными проблемами являются переход в область более высоких частот, значительный рост числа ускоряющих резонаторов, увеличение суммарной мощности установки.

В связи с неизбежным повышением радиоактивности в кольцевом зале во всех новых разработках надо обеспечить разное улучшение надежности аппаратуры и соответствующую защиту аппаратуры с полупроводниками.

УП. ИМПУЛЬСНЫЕ МОДУЛЯТОРЫ

Особой чертой большинства в.ч. установок для ускорителей и т.я. исследований является необходимость создания импульсных модуляторов на напряжения от 25-30 до нескольких сот киловольт на длительности импульса от нескольких микросекунд до десятков миллисекунд. Энергия в импульсе таких модуляторов достигает 100 и более килоджоулей. Частота повторения импульсов доходит до 50-60 раз в секунду. Обычно требуется прямоугольная форма импульса, однако, в некоторых случаях импульс должен иметь более сложную форму.

Модуляторы работают на мощный в.ч. тракт, собранный на клистро-

не, магнетроне или ламповой линейке. Нагрузка модулятора часто меняется в довольно широких пределах.

Существуют и импульсные модуляционные установки самостоятельного значения - импульсные генераторы напряжения и тока, работающие соответственно на вакуумную камеру и расширительную обмотку бетатрона.

Ниже приводятся соображения о построении модуляторов с большой длительностью импульса; схемы модуляционного тракта для в.ч. устройств электронных линейных ускорителей, характерные использованием мощных клистронов с длительностью импульса в несколько микросекунд не рассматриваются.

Требования к фронту, спаду и вершине импульса модулятора определяются требованиями ко всей радиотехнической установке и выбранной схемой ее построения.

При работе на ламповый генератор длительность фронта и спада обычно находится в пределах 5-7%, неравномерность вершины в пределах 2-5%, стабильность амплитуды в тех же пределах. Лишь в отдельных случаях на неравномерность вершины налагаются значительно более жесткие требования - до десятых долей процента. Высокая стабильность вершины огибающей в.ч. импульса может быть обеспечена в значительной степени построением самого модулятора. Используются и методы противосвязи по огибающей, при которых воздействие оказывается на возбуждение в.ч. тракта или на амплитуду модулятора. Первый из этих способов использован, например, в генераторе антипротонного канала в Дубне, где неравномерность вершины с введением обратной связи уменьшается с 8% до 0,5%. Второй способ, примененный в Аргоннском линейном ускорителе, дает снижение неравномерности плоской части импульса с 2% до величины менее 0,5%.

При работе на магнетрон, к модулятору предъявляются значительно более жесткие требования, длительность фронта должна быть порядка 0,1-0,3 мксек, неравномерность вершины менее 2%. При использовании магнетронного генератора в установках т.я. синтеза, иногда необходимо обеспечить внутриимпульсную амплитудную модуляцию, с регулировкой ее глубины в широких пределах.

Мощные оконечные лампы в ряде случаев целесообразно манипулировать не только по аноду, но и по сетке; это дает возможность оптимально выбрать рабочую точку и облегчить работу анодного модулятора.

При нагрузке, меняющейся в широких пределах, часто приходится отказываться от применения модуляторов, требующих согласования.

Построение модуляторов может быть осуществлено с искусственной линией и тиратронным разрядником, с частичным разрядом и ламповым коммутатором, с импульсным трансформатором и без него. Это общеизвестные схемы.

На рис. 16 приведено несколько сравнительно малоизвестных схем построения модуляторов, разработанных в последние годы.

Остановимся на некоторых моментах работы этих схем.

1/ Модулятор с частичным разрядом на тиратроне. Применение схемы наиболее удобно при использовании тетрода.

2/ Высоковольтный модулятор с последовательным соединением тиратрона и лампы.

Тиратрон Л1 поджигается автоматически при подаче импульса на сетку лампы Л2. На нагрузке R_H образуется отрицательный импульс.

3/ Модулятор с вакуумной лампой и обратной связью. В схеме применена высоковольтная коммутирующая лампа. Используется в линейном Аргоннском ускорителе.

4/ Модулятор с линией и обратной связью через вспомогательный ламповый модулятор.

Нагрузка R_H может быть включена и после повышающего импульсного трансформатора. Основная энергия коммутируется тиратроном и лишь малая доля приходится на лампу.

Схема обеспечивает высокий КПД при хороших качественных показателях и сравнительно простых коммутирующих приборах.

5/ Модулятор с искусственной линией и регулируемой длительностью импульса.

6/ Модулятор с частичным разрядом и регулируемой длительностью импульса.

На рис. 17 приведена блок-схема высоковольтного модулятора, в котором использованы элементы 2 и 6 рис. 16; выходной импульс модулятора обладает крутыми фронтом и спадом и малой неравномерностью вершины.

Основные параметры модулятора:

Максимальная импульсная мощность - 50 Мвт,
Максимальное выходное напряжение - 45 кв,
Полярность импульса - отрицательная
Максимальный импульсный ток - 1100 а.
Длительность выходного импульса - 1-100 мксек.
Длительность переднего фронта импульса - 0,3 мксек.
Максимальная частота повторения - 1 раз/сек.
Минимальная скважность - 25000.

Рассмотрим кратко работу схемы.

От внешнего синхронизатора поступает импульс на вход запускающего устройства. Это устройство имеет два выхода, импульсы с которых задержаны один относительно другого на плавно регулируемую величину от 1 до 100 мксек. Первый импульс поджигает тиратрон ТГИ-400/16 и конденсаторы ИМ-5-150 разряжаются на промежуток сетка-катод лампы ГИ-26Б. Импульс со второго выхода запускающего устройства, задержанный относительно первого на время, равное длительности импульса, поджигает тиратрон ТГИ-700/25. При этом искусственная линия разряжается на сопротивление R_p и тиратрон ТГИ-400/16 гаснет.

Тиратрон ТГИ-2500/35, включенный последовательно с лампами ГИ-26Б поджигается автоматически с приходом импульса от сеточного манипулятора и гаснет, когда импульс прекращается. Тиратрон ТГИ-2500/35, который по паспорту допускает работу с максимальной длительностью импульса 10 мксек, успешно работает при длительности импульса 100 мксек в токе 1100 а.

Через кенотрон В1-0,15/55 подается опорное напряжение +20 кв на аноды лампы ГИ-26Б.

Рассмотрим некоторые характеристики отдельных элементов модуляционного тракта.

Разрядники

Исследования типовых ртутных тиратронов показали возможность их использования в режиме больших импульсных токов, при длительности импульса в несколько миллисекунд. Экспериментально подтверждена возможность применения и короткоимпульсных водородных тиратронов для коммутации импульсов большой длительности. В таблицах рис. 18а и 18б приведены данные нетиповых режимов некоторых тиратронов, а также параметры отдельных модуляторных ламп.

Так как приведенные режимы использования водородных тиратронов отличаются повышенной длительностью импульса, то при номинальном значении среднего тока потери на аноде несколько падают из-за снижения средних стартовых потерь /т.к. ниже частота повторения и меньше величина импульсного тока/. Использование водородных тиратронов дает определенные преимущества при построении модуляторов с большой длительностью импульса, - оно снимает температурные ограничения, характерные для ртутных тиратронов и разрешает использовать схему с частичным разрядом с хорошим кпд, т.к. мощность для гашения этих тиратронов сравнительно невелика из-за малого времени их деионизации.

Заслуживает исследования и дальнейшего развития управляемый дуговой разрядник, разработанный ФТИ АН УССР

Конденсаторы

В зависимости от режима работы в мощных импульсных модуляторах используются конденсаторы с удельной энергоемкостью от 1 до 65 дж/кг.

| | | | |
|-------|---------|--------|-----------------------------|
| КМ | - 10,5 | - 10,1 | - 1 дж/кг |
| ПКГИ | - | - | -1,7 дж/кг |
| КБГИ | - 10-2 | мкф | -3 дж/кг |
| К41-1 | - | - | -5,5 дж/кг |
| ПКГТ | - | - | -7,5 дж/кг |
| ИМ | - 50-3 | - | -7,5 дж/кг |
| ИМ | - 5-150 | - | -29 дж/кг |
| ИМ | - 3-100 | - | -17 дж/кг |
| ИНС- | 6-200 | - | -65 дж/кг /предвар. данные/ |

При частоте повторения порядка 100 + 200 раз/сек в режиме линии используются конденсаторы с энергоемкостью 1 дж/кг /косинусные конденсаторы/. При малой средней мощности могут использоваться самые энергоемкие конденсаторы.

Импульсные трансформаторы

Необходимость в выходных импульсных трансформаторах возникает в тех случаях, когда разрядники и накопители не позволяют спроектировать модулятор непосредственно на заданные напряжения или токи. Наличие импульсного трансформатора не только существенно увеличивает вес и габариты установки, но и, как правило, ухудшает качественные показатели. Так, фронт импульса при наличии обычного импульсного трансформатора составляет, примерно, несколько процентов /до 10%/ от длительности импульса, что далеко не всегда допустимо.

Оригинальным решением является использование коаксиального радиочастотного кабеля для изготовления импульсных трансформаторов. В этом случае роль первичной обмотки принадлежит оплетке кабеля, а вторичной обмоткой является жила. Разделив весь кусок кабеля на две части и соединив обе оплетки параллельно, а жилы последовательно, можно получить коэффициент трансформации равный двум. Кабельные трансформаторы обеспечивают весьма хорошие качественные показатели при длительности импульса вплоть до нескольких мсек и амплитуде до 30 кв. Импульсный трансформатор из кабеля РК-19 на длительность импульса 1000 мксек обеспечивает фронт около 0,5 мксек на нагрузке в несколько десятков ом.

Следует считать, что начиная с длительности импульса в несколько сот микросекунд при мощности в несколько мегаватт применение импульсных трансформаторов нежелательно.

Защита аппаратуры

Основной проблемой является защита генераторной и модуляторной ламп /или другого типа разрядника в модуляторе/ при пробое одной из них, а также выпрямителя, при любой неисправности нагрузки, приводящей к увеличению потребляемого тока. При импульсе большой длительности желательно, чтобы схема защиты срабатывала до окончания импульса, через несколько микросекунд после пробоя в лампе.

При наличии в импульсном модуляторе двухстороннего коммутатора, защита генераторной или модуляторной лампы при пробое генераторной лампы осуществляется довольно просто. Защита той и другой лампы при пробое модуляторной лампы значительно сложнее. В этом случае необходимо либо быстро разрядить весь накопитель через вспомогательную схему, либо применить специальную систему, позволяющую за малое время отключить пробитый элемент.

В некоторых установках требуется создать изменяющееся во времени импульсное напряжение сравнительно большой длительности /десять и более миллисекунд/. Для повышения КПД, в этом случае целесообразно использовать управляемый выпрямитель /однако, регулировку нельзя осуществлять изменением момента поджига тиратронов выпрямителя, т.к. это приводит к резкому увеличению пульсаций/.

В аппаратуре Ереванского ускорителя для этой цели применен ступенчатый модулятор на тиратронах со специальной схемой гашения. Одновременно такой модулятор успешно решает и задачу защиты генераторных ламп при пробоях.

В таблице рис.19 приведены параметры некоторых модуляторов. В перспективе, в связи с потребностью в источниках питания с энергией в импульсе, достигающей в некоторых случаях до миллионов джоулей, при напряжении до 50кв для ламп и 100 /и более/ кв для клистронов необходимо, очевидно, уделить серьезное внимание построению элементов модуляционных устройств.

УШ. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Радиотехническое оборудование для физических исследований предназначено, как правило, для уникальных установок и поэтому, в основном, аппаратура повторно не изготавливается. Конечно, ряд отработанных трактов мощной электроники иногда используется и в других установках.

По назначению следует различать два типа в.ч. аппаратуры - I/ для

отработки принципа действия и исследования самой физической установки 2/ для проведения экспериментов на установке, т.е. ее эксплуатации. Установки второго типа должны быть отработаны особенно тщательно, с учетом условий эксплуатации.

В связи с расширением числа учреждений, занимающихся физическими исследованиями, и использованием ускорителей в металлургии, химии, медицине, имеет место и мелкосерийный выпуск таких установок как генераторы для циклотронов, импульсные генераторы напряжения и тока для бетатронов, в.ч. оборудование для линейных ускорителей электронов на сравнительно малые энергии.

В настоящее время во всех странах мира действуют или заказываются сооружения около 26 ускорителей на энергию свыше 1 ГэВ.

Тенденция создания источников частиц со все нарастающей энергией и интенсивностью заставляет разрабатывать новые методы ускорения и проектировать гигантские машины.

На конференции в 1963 г. в Дубне было доложено о семи проектах таких ускорителей на энергию от 100 до 1000 ГэВ с длиной кольца от 8 до 26 км /см.рис.20X/. Во всех проектах главенствует автоматическое управление, сечение камеры находится в пределах от 3x2 до 5x12см частоты ускоряющего поля лежат в диапазонах от 50 до 500 МГц, в.ч. мощность доходит до сотен МВт, количество в.ч. генераторов в одном комплексе до 1000.

Очевидно, в ближайшее время, в связи с развитием в.ч. направления в термоядерном синтезе, встанут задачи создания генераторов на весьма значительные мощности. Не касаясь методов, не вышедших из стадии начальных поисков /ускорение в световом диапазоне волн, ускорение плазменных ступок э.м. полем/, общую тенденцию в развитии мощной радиофизической аппаратуры можно, пожалуй, характеризовать следующими положениями: переход в область более высоких частот во всех диапазонах, кроме СВЧ, где наблюдается переход от 10 см к более длинным волнам, увеличение мощности, повышение длительности импульса, увеличение скорости перестройки, рост числа синфазно работающих генераторов.

X/ Комиссия по Атомной Энергии США приняла решение о строительстве двух ускорителей на 1000 ГэВ и одного на 200 ГэВ /38/; в ЦЕРН"е /Женева/ к концу 1966 г. должно быть определено строительство ускорителя на 300 ГэВ /39/.

В связи с ростом в.ч. мощности, во многих случаях, становится все более актуальным повышение кпд в.ч. генераторов и, в связи с этим, необходимость разработки мощных ламп с большим коэффициентом усиления. Повышение рабочей частоты генераторов с перестройкой до 100 и 250 Мгц, увеличение скорости перестройки требует создания новых типов ферритов. Необходима разработка и ряда других изделий.

Автор выражает благодарность Б.М.Гутнеру, Е.Б.Иссерлину, И.А.Квашонкину, А.С.Темкину, И.Г.Уманскому за помощь в подготовке некоторых вопросов, освещенных в статье и С.М.Рубчинскому за ценные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.П.Бэнфорд. ВЧ-измерения на сверхпроводящих резонаторах для линейного ускорителя. Труды международной конференции по ускорителям, Дубна, 1963 г., стр.541.
2. Г.А.Зейтленок и др. Выбор оптимальных параметров линейного ускорителя электронов. См. I, стр. 430.
3. Miyahara Клистронный усилитель и система радиочастотного питания линейного ускорителя - инжектора для электронного синхротрона. *Journal of the Physical Society of Japan*, v. 16, № II, 1961, 12, стр.2567.
4. В.Г.Панофский. Строительство двухмиллионного Стенфордского ускорителя. См. I, стр.407.
5. Г.И.Будкер и др. Работы по сильноточным ускорителям Института Ядерной Физики СО АН СССР. См. I, стр.1065.
6. Н.А.Хижняк и др. О возможности ускорения больших импульсных токов в линейных электронных ускорителях. *Атомная Энергия*, 1961, II, стр. 34.
7. Г.А.Восс. Работа Кембриджского электронного синхротрона. См. I, стр.222.
8. С.А.Хейфец. Электронный синхротрон. Издательство АН Армянской ССР. Ереван, 1963 г.
9. В.В.Владимирский и др. Протонный синхротрон на 7 Гэв. Приборы и техника эксперимента, 1962, 4, стр. 5.
10. E. Regenstreif. The CERN Proton Synchrotron, P 2, CERN, 60-26, P 3, 62-3
11. И.М.Капчинский и др. О проекте инжектора для протонного синхротрона на энергию 70 Гэв. См. I, стр. 462.
12. А.Д.Белов и др. Автоматическое регулирование и измерение параметров в.ч. полей в линейном ускорителе - инжекторе на энергию 100 Мэв. См. I, стр. 471.

13. В.Г.Агбалян и др. Ереванский электронный синхротрон на энергию 6 Гэв. См. I, стр. 235.
14. Г.А.Зейтленок и др. Отклоняющая система антипротонного канала на 5 Гэв. См. I, стр.791.
15. Д.В.Каретников и др. Линейные ускорители ионов. Госатомиздат, 1962.
16. Д.Абрахам и др. Опыт работы с инжектором протонного синхротрона с нулевым градиентом. См. I, стр.499.
17. В.М.Леонова и др. Опыт использования мощных генераторных ламп в импульсном режиме. *Радиотехника*, т.13, № II, 1958, стр. 39.
18. D.Reed, A.Tuhis. Superpower ultrahigh-frequency amplifier-tube developments. *Communications and Electronics*, 1962, Sept., N.62, p.290.
19. Г.И.Будкер и др. Работы по встречным пучкам в Институте Ядерной Физики СО АН СССР. См. I, стр. 274.
20. А.Г.Алексеев и др. Циклотрон с диаметром полюсов магнита 120 см. *Атомная энергия*, т.7, август 1959, вып.2, стр. 148.
21. H.F.Ziegler. A high-voltage regulator for the ORNL86-inch cyclotron. *Nuclear Instruments and Methods*, 18, 19, 1962, 197
22. А.А.Глазов и др. Релятивистский протонный синхротрон на энергию 700 Мэв. См. I, стр.547.
23. В.А.Гриц и др. Импульсные сильноточные в.ч. ускорители для однооборотной инжекции в синхротрон. См. I, стр.1080.
24. Всесоюзная научная сессия НТОРиЭ имени С.А.Попова, посвященная дню радио. *Радиотехника*, т.18, № 10, 1963, стр.77.
25. Ф.А.Водолюбков и др. Система генерирования ускоряющего поля протонного синхротрона на энергию 70 Гэв. См. I, стр. 932.
26. В.М.Лебедев-Красин и др. Ускоряющие элементы протонного синхротрона и система их высокочастотного питания. Приборы и техника эксперимента, 1962, 4, стр. 94.
27. G.Delyon и др. Circuit Magnétique en ferrite pour la cavité du synchrotron (Le synchrotron a protons SATURNE). *L'Onde Electrique* 1959, 39, № 387, p.556
28. Д.Киргесснер и др. ВЧ-система Принстонско-Пенсильванского ускорителя. См. I, стр. 181.
29. M.Plotkin. The Radio frequency accelerating system for the Brookhaven alternating gradient synchrotron. *IRE International Convention Record*, part 9, 1960, p.19.
30. И.Х.Невяжский и др. Применение индуктивностей с ферритовыми сердечниками в контурах мощных высокочастотных каскадов синхрофазотрона. *Радиотехника и электроника*, 1956, т.1, вып.1, стр.954.

31. Э.Л.Бурштейн и др. Кибернетический ускоритель на энергию 1000 Гэв. См. I, стр. 67.
32. Ф.А.Водопьянов. Протонный синхротрон на энергию 6-7 Гэв. См. I, стр. 213.
33. Е.Б.Иссерлин. Генератор прямоугольных импульсов. Авторское свидетельство 136786, 1960 г. Бюлл. изобр. 1961 г., № 6
34. А.И.Мермонштейн. Схема формирования прямоугольных импульсов с переменной длительностью при разряде разомкнутой искусственной линии. Авторское свидетельство 13103, 1951 г. Опис.изобр. № 8, 1959г. г.
36. Развитие силового конденсаторостроения. ЦИТИ Электротехнической промышленности и приборостроения. Москва, 1962 г.
37. А.С.Насибов. Импульсный трансформатор с обмотками из коаксиального кабеля. Электричество, 1965, 2, стр.26.
38. Atomic Energy Clearing House, 10, N.5, 3.02.1963. Washington Atomic Energy Reports, 10, N.5, 4.02. 1964.
39. Atomo e Industria, № 13-14, II, 1-15 июня 1964.
40. Гутнер Б.М., Екимов В.В., Залманзон В.Б., Темкин А.С. Особенности мощных высокочастотных генераторов, используемых в ускорителях заряженных частиц. Вопросы Радиозлектроники, серия X, вып. , 1966 г. /в печати/.
41. Минц А.Л., Невяжский И.Х., Поляков Б.П. Некоторые особенности и основные данные высокочастотной системы шестиметрового фазотрона. Радиотехника и Электроника, 1956, т.1, вып. 7, стр.898.
42. W.Schell. An RF System for a 300 fev proton synchrotron with mechanically tuned cavities, p.927

Классификация РФ-оборудования по диапазонам волн

| Длина волны (метр) | Суммарная б/г мощность установки | Длительность импульса | Физ. приборы |
|--------------------|--|--|--|
| 0,1-0,2 | До сотни мегаватт | От единиц до десятков микросекунд | Линейные ускорители электронов, Микротроны |
| 0,2-0,3 | До десяти мегаватт | До 10 миллисекунд | Установки удержания плазмы стоячей волной |
| 0,5-3 | До десятков мегаватт | От сотен микросекунд до десятых долей секунды | Кольцевые электронные ускорители, Линейные протонные ускорители, Установки удержания плазмы стоячей волной и нагрева плазмы. |
| 3-300 | От сотен миловатт до нескольких мегаватт До 50 мевт | a) Непрерывный режим б) От долей секунды до нескольких секунд при малой скважности От единиц до десятков миллисекунд | Циклические протонные ускорители, Исследовательские кольца. Установки нагрева плазмы и ее удержания бегущим магнитным полем |

Рис. 1

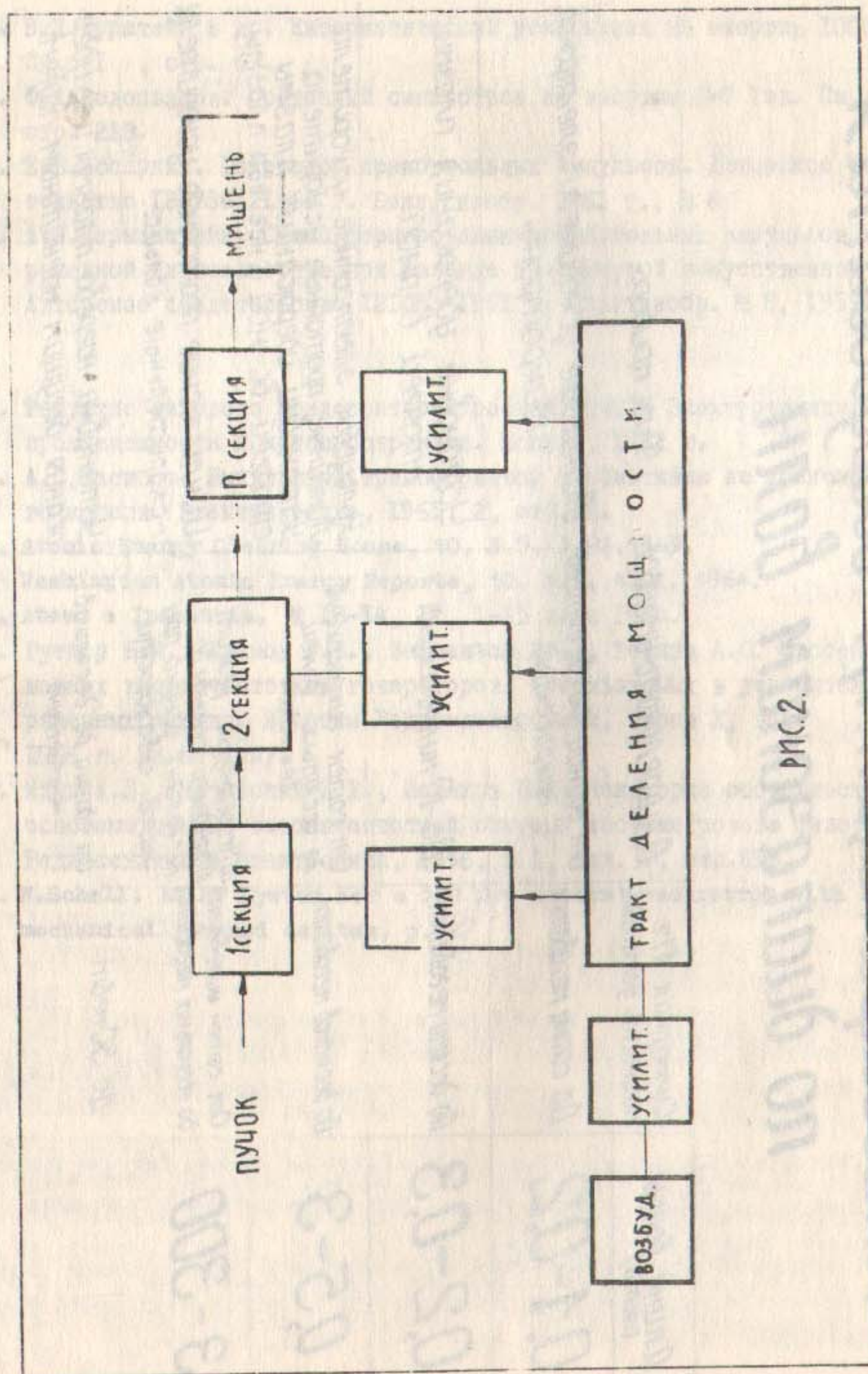


Рис. 2.

Линейные ускорители тяжелых частиц.

| Местоположение | E | Э.пучк | λ | τ _и | F _п | P _{б.ч.} | Тип и кол-во выходных ламп | Кол-во резонаторов | Кол-во б-ч каналов |
|---------------------------------|-------------------------------|--------|--|----------------|----------------|----------------------------------|---|--------------------|--------------------|
| | МэВ | мкА | м | мксек | имп/сек | МВт | | | |
| Брукхейвен, США | 50 | 2500 | 148 | 200 | 5 | 4 | 2x TH-470 | 1 | 2 |
| ЦЕРН, Женева | 50 | 5000 | 148 | 10 | 5 | $\frac{1}{18}$ $\frac{1}{19}$ | 3x TH-470 | 3 | 3 |
| Аргонн, США | 50 | 5000 | 148 | 500 | 5 | 5 | RCA-7835 | 1 | 1 |
| Беркли, США Шейль, США | $\frac{10}{\text{на нуклон}}$ | — | 4.3 | 3000 | 15 | 3 | 4x RCA-A2332LFC | 2 | 4 |
| Беркли, США | 32 | 60 | 1.5 | 600 | 15 | 225 | 9x Eimac 3W10000A3 | 1 | |
| ИТЭФ Москва, СССР | | | 2.02 | 800 | 7 | 3 | 3x ГУ-4А | 1 | 3 |
| Серпухов СССР | 100 | | 2 | 300 | 0.25 | 9-15 | 3x ГУ-27А | 3 | 3 |
| Лубна, СССР | | | 2 | 6000 | 0.08 | 15 | 2x ГУ-24А | 16 | 1 |
| Ускоритель Виллеры (проект) США | 800 | | $\frac{15}{0.75}$ $\frac{0.25}{0.25}$ | 3000 | 20 | 50 | 10x RCA-7835 10x RCA-2054 20 кластр L3401 | | 10 10 10 |

Рис. 5.

Электронные линейные ускорители.

| Местоположение | E | P _{ср.пучк} | λ | τ _и | F _п | Кол-во СВЧ генераторов | P _{свч генератора} |
|------------------------------------|-----------|----------------------|----|----------------|----------------|------------------------|-----------------------------|
| | ГэВ | кВт | см | мксек | имп/сек | — | МВт |
| Тарьков, СССР | 2 | 2.6 | 10 | 1.3 | 50 | 50 | 20 |
| Ренселярский ин-т США | 0.035 | 48 | 23 | 30 | — | 9 | 10 |
| Ф. Викерс, Англия | 20 | 70 | 10 | 5 | 50 | 180 | 20 |
| Стенфорд, США (проект 2-й очереди) | 24 или 48 | 1200-2400 | 10 | 2.5 | 360 | 960 | 24 |

Рис. 3.

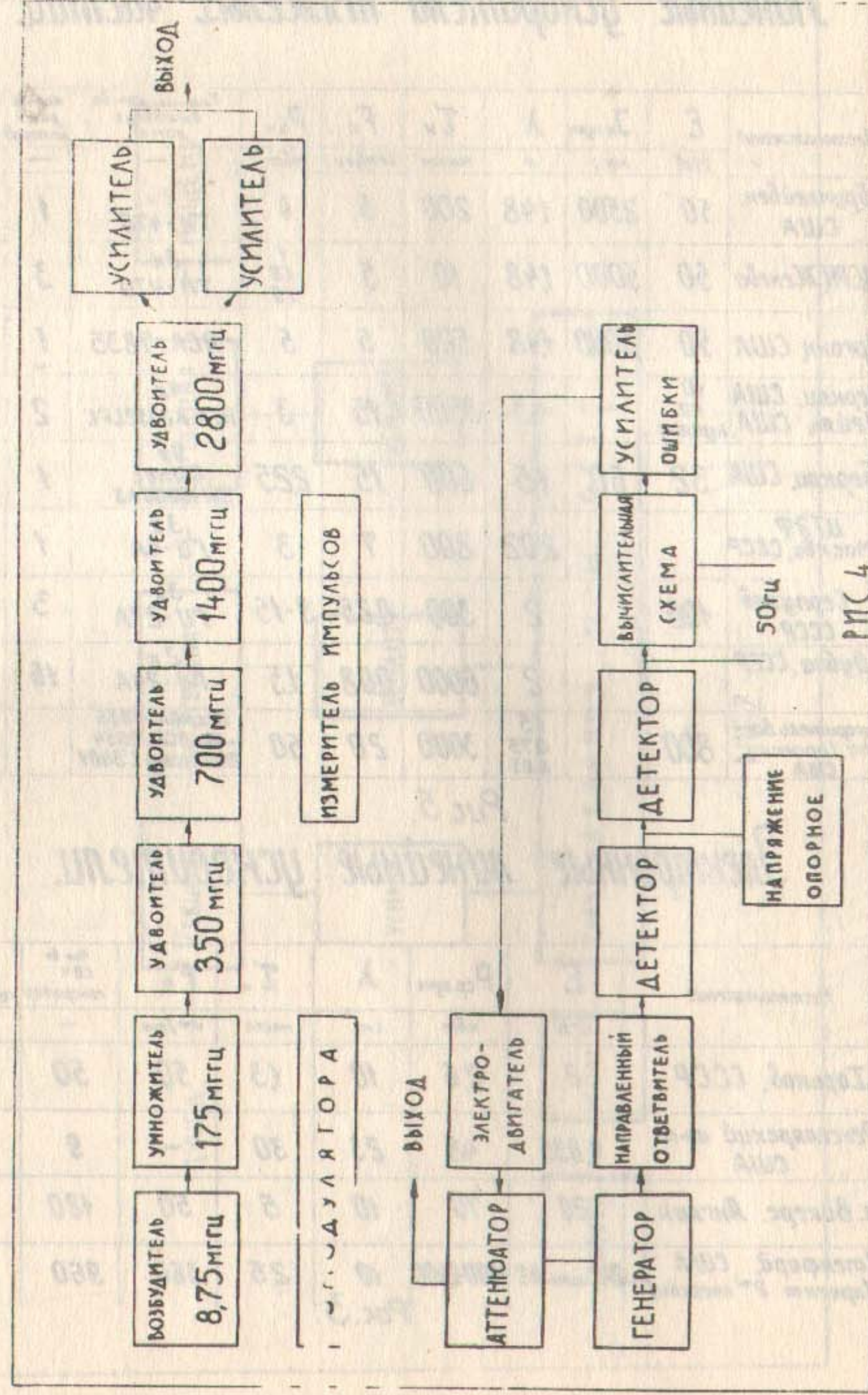


РИС. 4

БОЛЬШЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СВЧ-УСТРОЙСТВА

| Принадлежность и местоположение ускорителя | Энергия электронная ГэВ | Рабочая кол-ва п | Число ускорительных импульсов в секунду | Число искрообразующих промежуток | Число частотных элементов | Число импульсов в секунду | Суммарная выс. част. мощность кВт | Тип и кол-во ступеней каскада | Выходная мощность ЦКЛ |
|---|-------------------------|------------------|---|----------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| Калифорнийский технологический институт США | 15 | 47 | $3 \cdot 10^7$ | 2 | 4024 | 1 | 100 | 2 ступени | 10 |
| Корнельский университет США | 13 | 44 | $2 \cdot 10^{10}$ | 1 | 869 | 30 | 7 | 2 ступени | 7.65 |
| Национальная лаборатория Роккеттс, США | 11 | 438 | 10^{10} | 2 | 437 | 20 | 40 | 2 ступени | 600 |
| Лундский университет Лунд, Швеция | 12 | 53 | - | 1 | 441 | 12.5 | 12 | 2 ступени | 10 |
| Токийский университет Токио, Япония | 13 | 55 | $3 \cdot 10^{10}$ | 1 | 1381 | 215 | 2 | 2 ступени | 7.65 |
| Гарвардский университет Кембридж США | 6.9 | 358 | 10^{10} | 32 | 4758 | 60 | 400 | КСА А15040 | 600 |
| Институт экспериментальной физики Гандзьяр, АРГ | 7.0 | 504 | 10^{10} | 16 | 4997 | 50 | 350 | 2 ступени | 10 |
| Физический институт Ян. ССР Бредан, СССР | 6 | 345 | 10^{10} | 24 | 13279 | 50 | 520 | 2 ступени | 7.65 |
| Физический институт Ян ССР Москва, СССР | 0.68 | 20 | 10^{10} | 2 | 192-20.4 | 0.2 | 20 | 2 ступени | 600 |

Рис. 6.

ПОСТРОЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ УКВ ГЕНЕРАТОРОВ

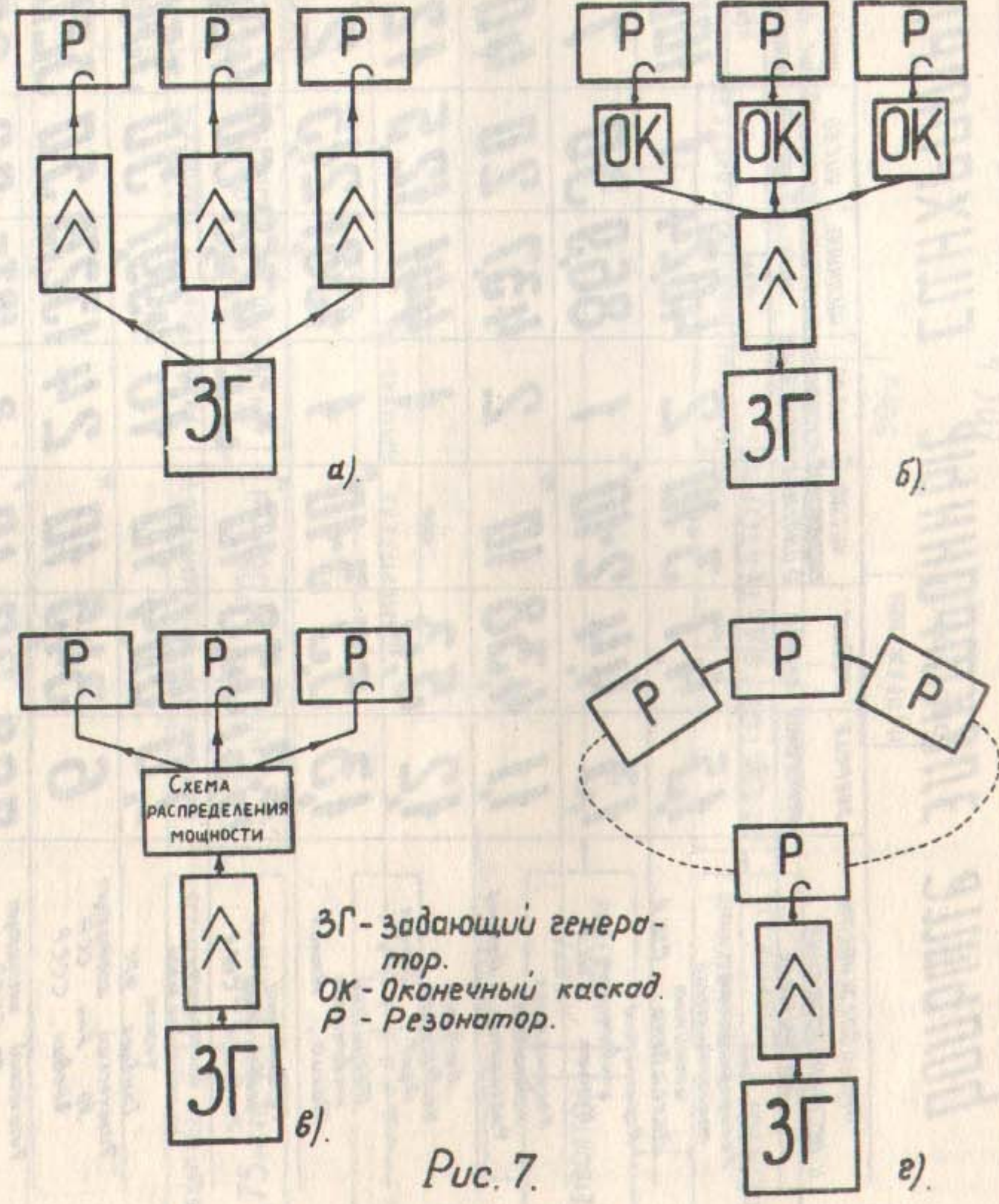
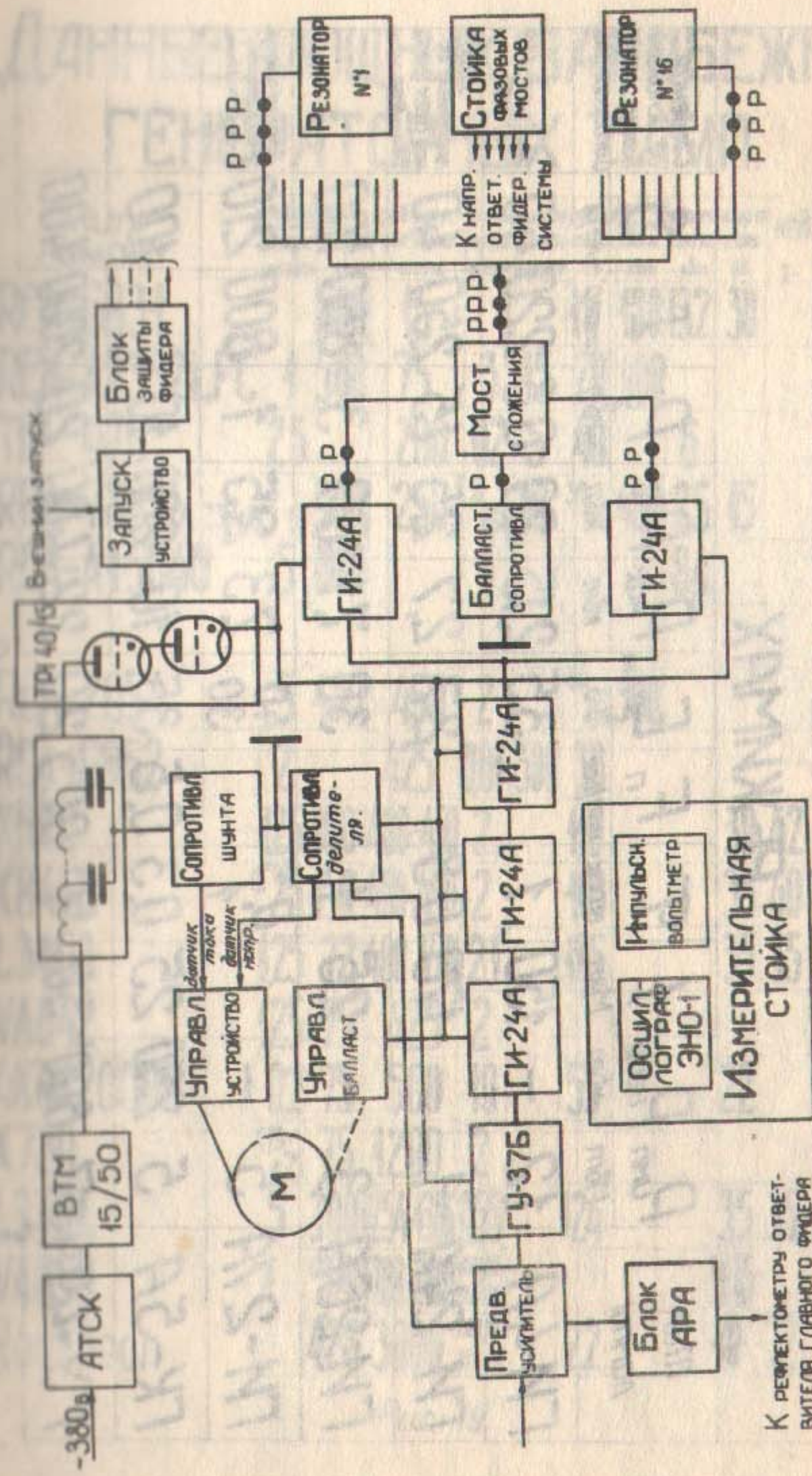


Рис. 7.



БЛОК-СХЕМА ВЧ ГЕНЕРАТОРА АНТИПРОТОННОГО КАНАЛА

Рис. 8.

ДАННЫЕ ИМПУЛЬСНЫХ ЛАМП И ЛАМП НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ В ИМПУЛЬСНЫХ РЕЖИМАХ

| Тип лампы | P _{имп} мВт | P _{непр} кВт | f МГц | τ мсек | F _p имп/сек | E _{ампл} кВ | P _{нак} кВт | P _а кВт | P _д кВт | I _e ампер | S м/в | Сведения об источнике ваннц. лампы балластature |
|-----------|-------------------------|--------------------------|----------|-----------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|----------|---|
| | | | | | | | | | | | | |
| ГИ-4А | 1,2 | - | 150 | 1 | | 35 | 2,5 | 20 | 0,8 | 220 | 40 | |
| ГИ-24А | 1 | - | 170 | 0,8 | | 27 | 2,7 | 25 | 15 | 250 | 40 | |
| ГИ-26А | 3 | - | 25 | 1 | | 30 | 7,1 | 60 | 3 | 850 | 100 | |
| ГИ-27А | 5 | - | | 0,5 | | 40 30 | 7,3 | 25 | 1 | 800 | 210 | |
| ГК-5А | 5 | 250 | 25 | 0,3 | | 35 | 10 | 200 | 10 | | 100 | |
| ГУ-49А | 7 | 600 | 50 | 1 | | 20 | 22 | 400 | 20 | 2000 | 400 | |

Рис. 9.

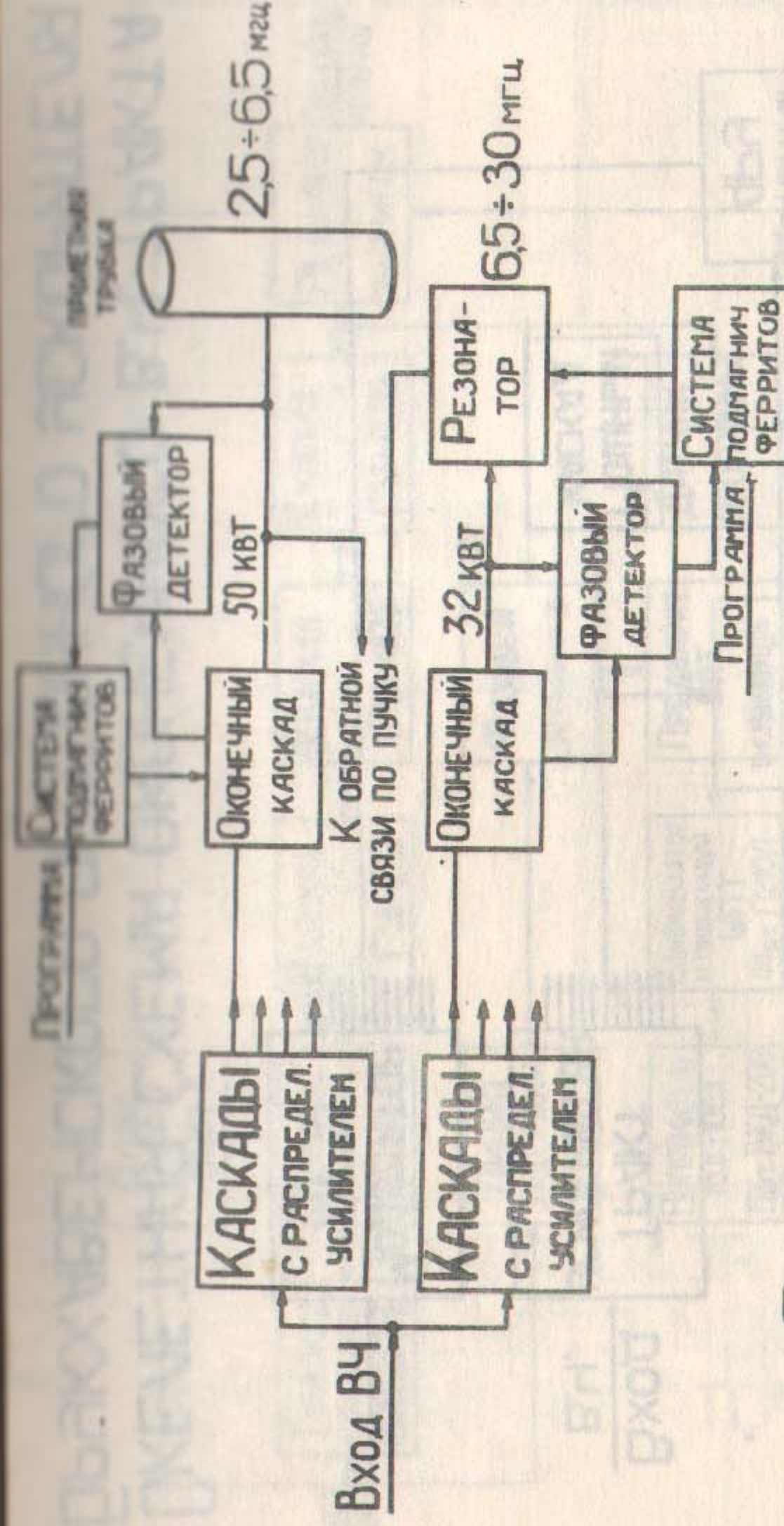
ДАННЫЕ МОЩНЫХ ЗАРУБЕЖНЫХ ГЕНЕРАТОРНЫХ ЛАМП.

| тип лампы | МОЩНОСТЬ | | рабочая частота мГц | длительность импульса мсек | частота повторения имп/сек | анодное напряжение кВ | минимум анодного тока кВ | минимум накала кВ | коэф. η | кпд % | примечание |
|----------------|-----------------|----------------|---------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|---------|-------|---|
| | импульс мВт | непрерыв кВт | | | | | | | | | |
| RCA-5831 | | 500 | 15 | | | 16 | 150 | 132 | 30 | | Кл. - 50 кВ от анода к катоду 5-100 кВ срок службы 20000 час |
| RCA-A2332LFC | 1 | 500 | 75 | 3 | 15 | 20 | 400 | | | | Ускорит. лампы на ИЭ-001 (Линейный ускоритель ИЭ-001) Лампы разработаны в ЦЕРН в Женеве и Виллермате. |
| TH-470 | 25 | | 200 | 0,2 | 5 | 40 | | 6 | | | вагоны ИЭ-600 и линейный ускоритель Виллермате в ЦЕРН |
| RCA-7835/A2346 | 5 ¹⁰ | 500 | 250 | 2 ¹⁰ | 10 | 35 ⁶⁰ | 400 | 25 | 15 | | лин. ускорител. Арзон К.м.к. - 30 Т = 0,5 мек |
| RCA-A15040 | 5 | 1000 | | 1 | | | | 8,4 | | | |
| RCA-2054 | 5 | 450 | 450 | 2 | | 60 100 | 300 | | | | до 600 мек. |
| RCA-6952 | 2 | | 425 | 0,01 | 300 | 30 | | | | | f _{max} - 600 мек |
| X626 | 125 | 100 | 400-450 | 2 | | 110 | | 30 | 42 | | |
| X841D | 25 | 150 | 400-450 | 2 | | 105 | | 33 | 40 | | радиолокация |
| L3403 | 125 | 72 | 400-450 | 2,1 | | 105 | | 35 | 35 | | L.3694 |
| VA842 | 125 | 75 | 425 | 2 | | | | | | | |
| 4KM120000 | 0,2 | 75 | 500 | 10 | | 55 | | | 22 | | Гамбургский электр синхротрон |
| X730 | 125/75 | 75 | 1200 | 2 | | | | | | | |
| L3401 | 5 | 300 | 1254-1300 | 0,55 | | 124 | | 35 | 35 | | |
| VA858 | | 122 мВт 175 | 1700-2400 | непрерывно | | | | | 51-65 | | |
| Roytheon | 425 | 3000 | | непрерывно | | 22 | | 10 | 72 | | |

Рис. 10.

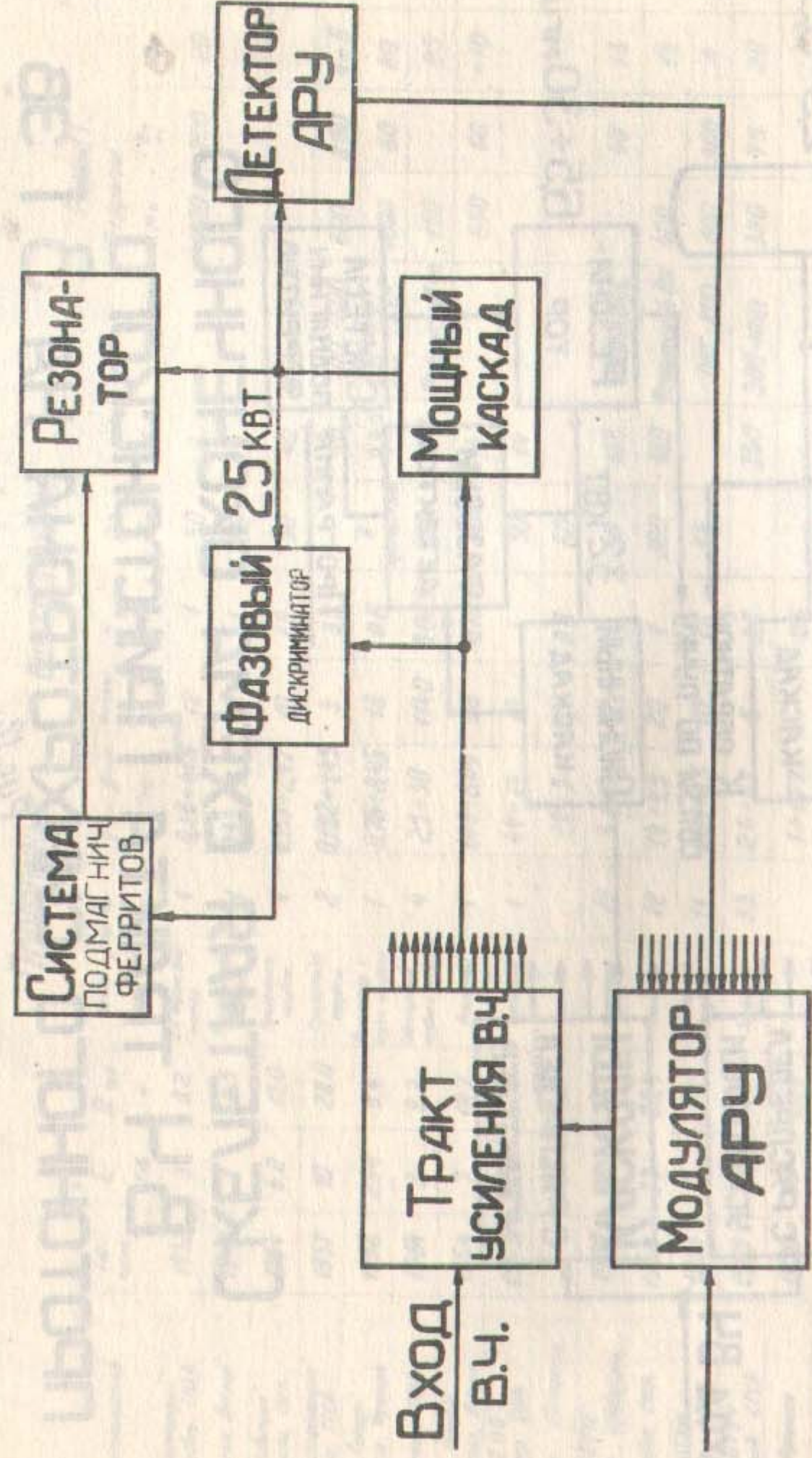
Протонные синхротроны

| Год пуска | E ГэВ | R м | Истор. устр. в. Тип | Кол-во | f _{инт.} -f _{пол.} МГц | Число циклов в мин | T устр сек | P дж кВт | Z _п кВ | Рис.11. Ферриты | | | |
|-----------|-------|------|-------------------------------|--------|--|--------------------|------------|------------------|-------------------|-----------------|-------|----------------|------|
| | | | | | | | | | | Мн | Дн кг | Q _н | |
| 1952 | 3 | 9,2 | Вч трансформатор | 1 | 0,36÷448 | 12 | 1 | 50 | 2 | 1000 | 200 | 20 | 107 |
| 1953 | 1 | 4,5 | Прямая труба | 1 | 0,33÷9,3 | 6 | 1 | 60 | | | | | |
| 1954 | 6,2 | 15,0 | Прямая труба | 1 | 0,355÷247 | 10 | 1,9 | 50 | 40 | Ферроксид | | | 0,32 |
| 1957 | 10 | 28,0 | Прямая труба | 2 | 0,182÷145 | 5 | 3,3 | | 40 | ОКС-600 | 800 | 4÷5 | 1,6 |
| 1958 | 2,94 | 8,4 | Аккумулятор с обратным пучком | 1 | 0,76÷845 | 18 | 0,8 | 6 прям. пучок | 2,32 | ФЕРРИТ | 1000 | 20 | 5,5 |
| 1961 | 3 | 9,2 | Субциклотрон | 4 | 2,5÷30 | 1140 | 0,025 | 400 | 120 | Ферроксид | 150 | 25 | |
| 1964 | 7 | 18,7 | Аккумулятор | 1 | 143÷804 | 28 | 0,72 | 80 | 14 | | 550 | 60 | ~10 |
| 1963 | 12,5 | 21,7 | Аккумулятор | 1 | 44÷14 | 15 | 1 | 50 | 14 | | | | |
| 1964 | 10,6 | 4,8 | | | 19÷9 | 0,1 | 0,8 | 60 | | | | | |
| 1959 | 28 | 70 | Аккумулятор | 16 | 3÷10 | 17 | 1 | 96 | 108 | ФИЛЛИПС | 40 | 13 | 10,0 |
| 1960 | 33 | 85,4 | Аккумулятор | 12 | 14÷4,5 | 20 | 1 | 300 | 180 | Ферроксид | 400 | 15 | 6,0 |
| 1961 | 7 | 40 | Прямая труба | 11 | 0,65÷8,5 | 40 | 1,6 | 55 | | ОКС-800 | 800 | 4 | 0,4 |
| 1965 | 70 | 167 | Аккумулятор | 53 | 2,6÷6,1 | 5 | 3,8 | | 350 | 300-НИП | 320 | 75 | 24,0 |
| 1970 | 60 | 254 | | | 1÷177 | | 0,6 | | | | | | |
| прото | 1 | | | | | | | | | | | | |
| прото | 6÷7 | | | | | | | | | | | | |
| прото | 0,625 | | | | | | | | | | | | |
| прото | 0,7 | | | | | | | | | | | | |

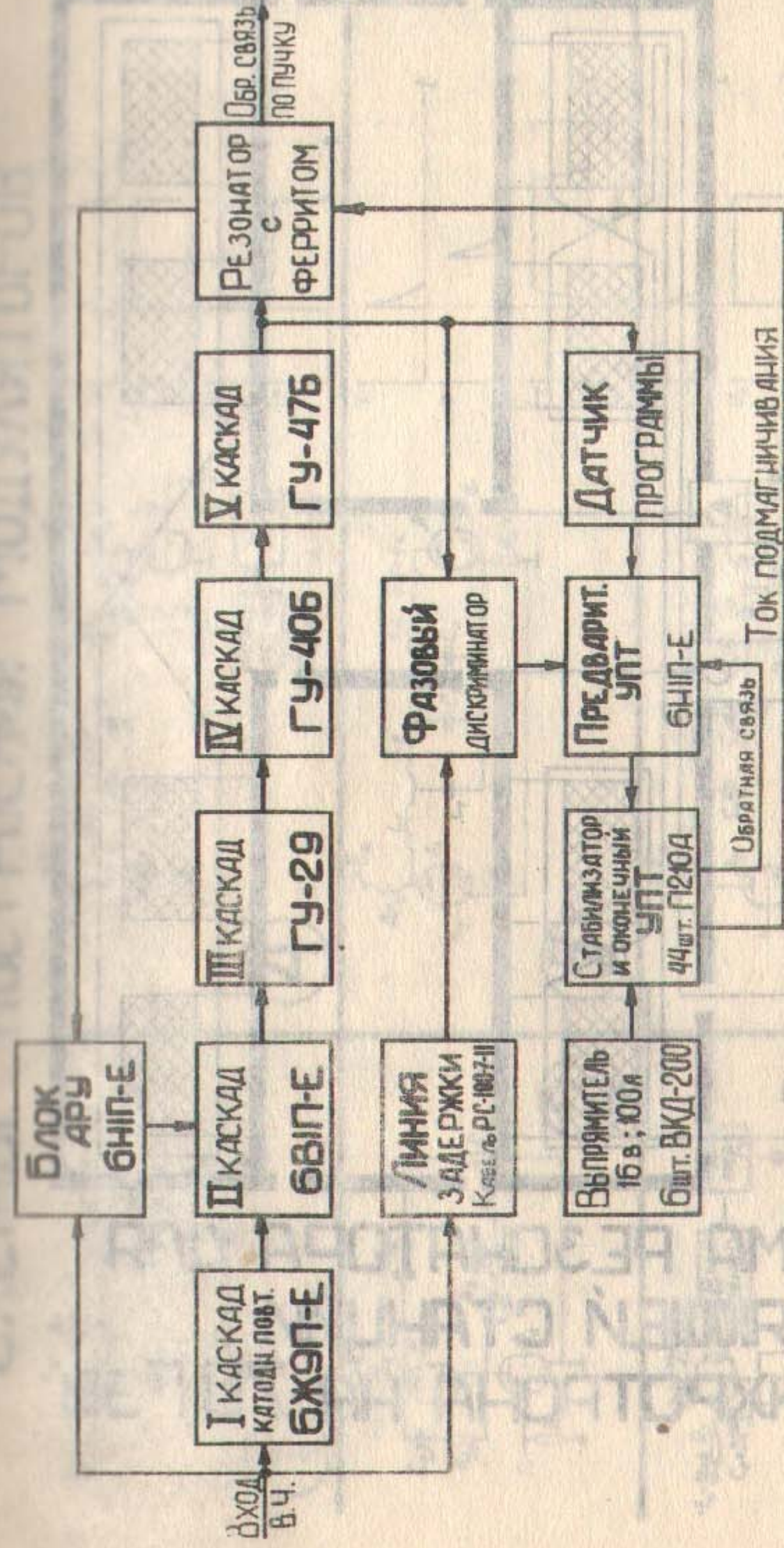


СКЕЛЕТНАЯ СХЕМА ОКОНЕЧНОГО ВЧ ТРАКТА ПРИНСТОНСКОГО ПРОТОННОГО СИНХРОТРОНА НА 3 ГЭВ

Рис.12.



СКЕЛЕТНАЯ СХЕМА ОКОНЕЧНОГО В.Ч. ТРАКТА БРУКХАВЕНСКОГО ПРОТОННОГО УСКОРИТЕЛЯ



СКЕЛЕТНАЯ СХЕМА ОКОНЕЧНОГО В.Ч. ТРАКТА ОДНОГО КАНАЛА УСКОРИТЕЛЯ

НА 70 ГЭВ

Рис. 14.

Рис. 15.

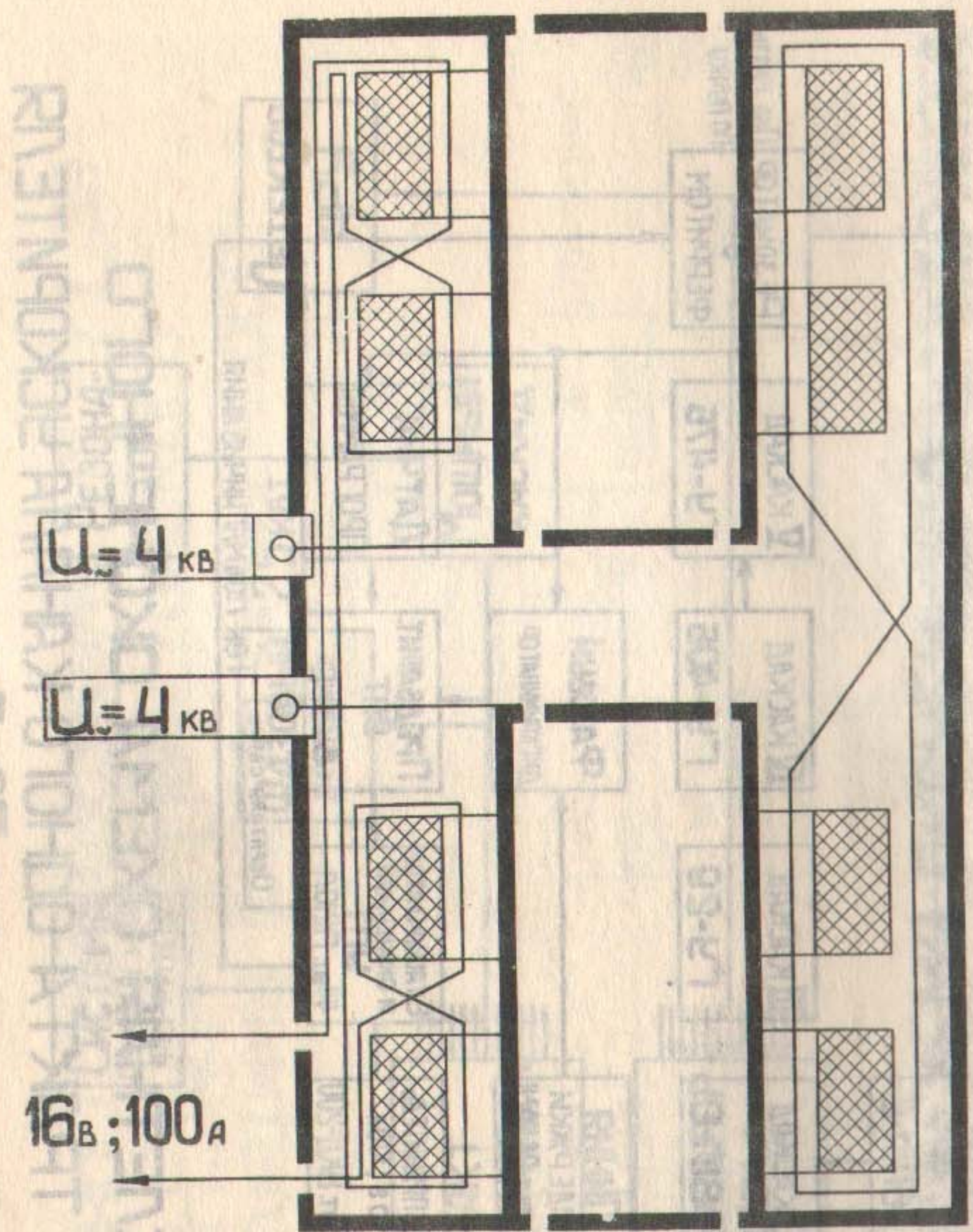


СХЕМА РЕЗОНАТОРА ДЛЯ
УСКОРЯЮЩЕЙ СТАНЦИИ
СИНХРОТРОНА НА 70 ГЭВ

СХЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ МОДУЛЯТОРОВ

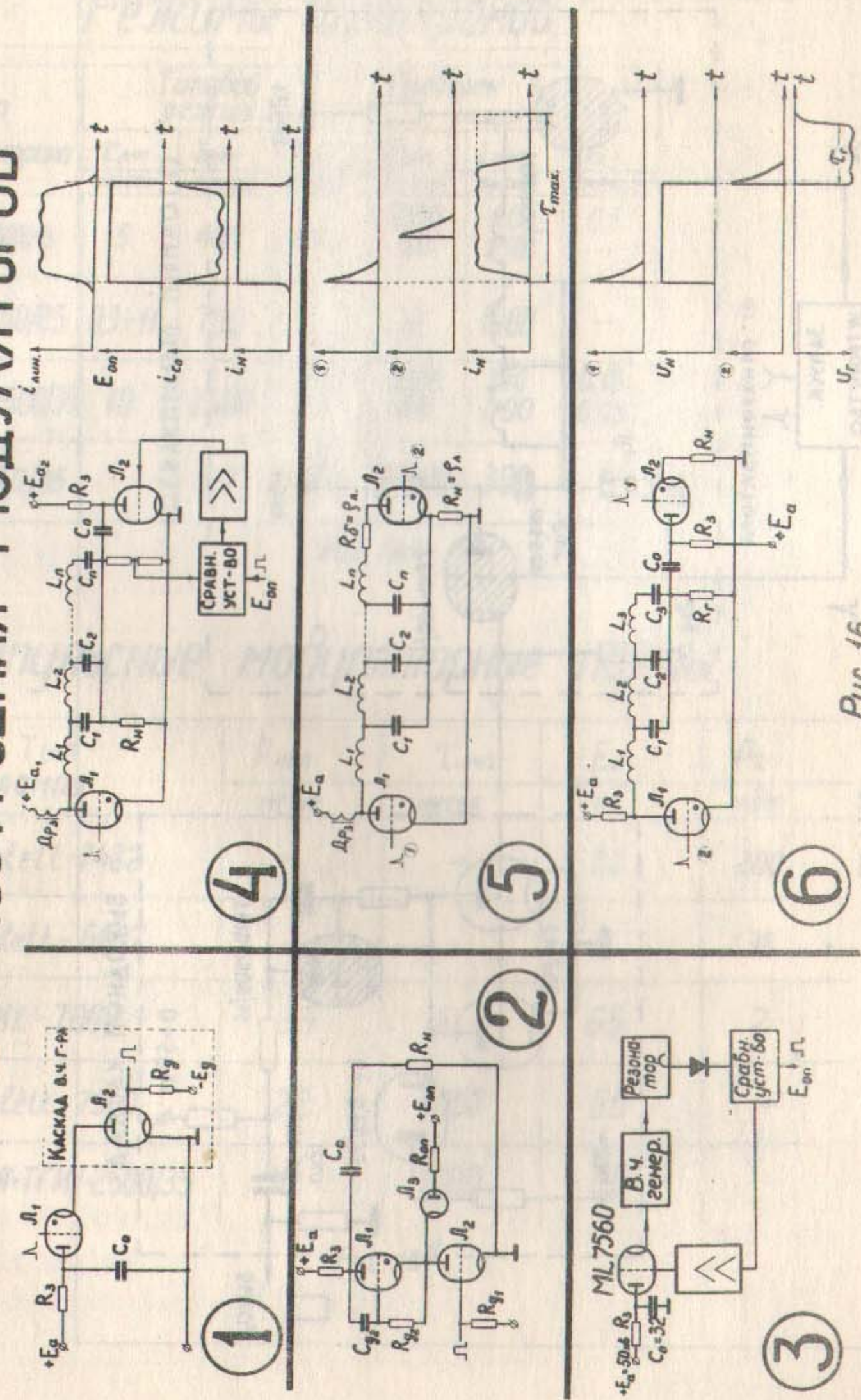


Рис. 16.

Режимы тиратронов

| Тип тиратрона | Типовой режим | | | Проверен в режиме | | |
|---------------|-----------------------|--------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| | $\tau_{имп}$ мксек | $I_{имп}$ ампер | $I_{ср}$ ампер | $\tau_{имп}$ мксек | $I_{имп}$ ампер | $I_{ср}$ ампер |
| ТГИ-400/16 | 5 | 400 | 0,5 | 3200 100 | 40 350 | 0,5 - |
| ТГИ-700/25 | 0,3-11 | 700 | 1 | 30 | 1000 | - |
| ТГИ-2500/35 | 10 | 2500 | 2,5 | 1000 100 | 300 1100 | 0,15 0,05 |
| ТР2-40/15 | | 120 | 40 | 20000 | 300 | 1 |

Рис. 18а

Импульсные модуляторные лампы

| Тип лампы | $P_{имп}$ | $\tau_{имп}$ | E_a | P_a |
|--------------------|-----------|--------------|-------|-------|
| | мгвт | мксек | кв | квт |
| Machlett-7482 | - | - | 20 | 200 |
| Machlett-6697 | - | - | 16 | 35 |
| ML-7002 | 3,5 | 6 | 65 | 2 |
| Machlett-7560 | 22 | 3000 | 60 | - |
| ГИ-26А-ТГИ-2500/35 | 30 | 1000 | 50 | |

Рис. 18б

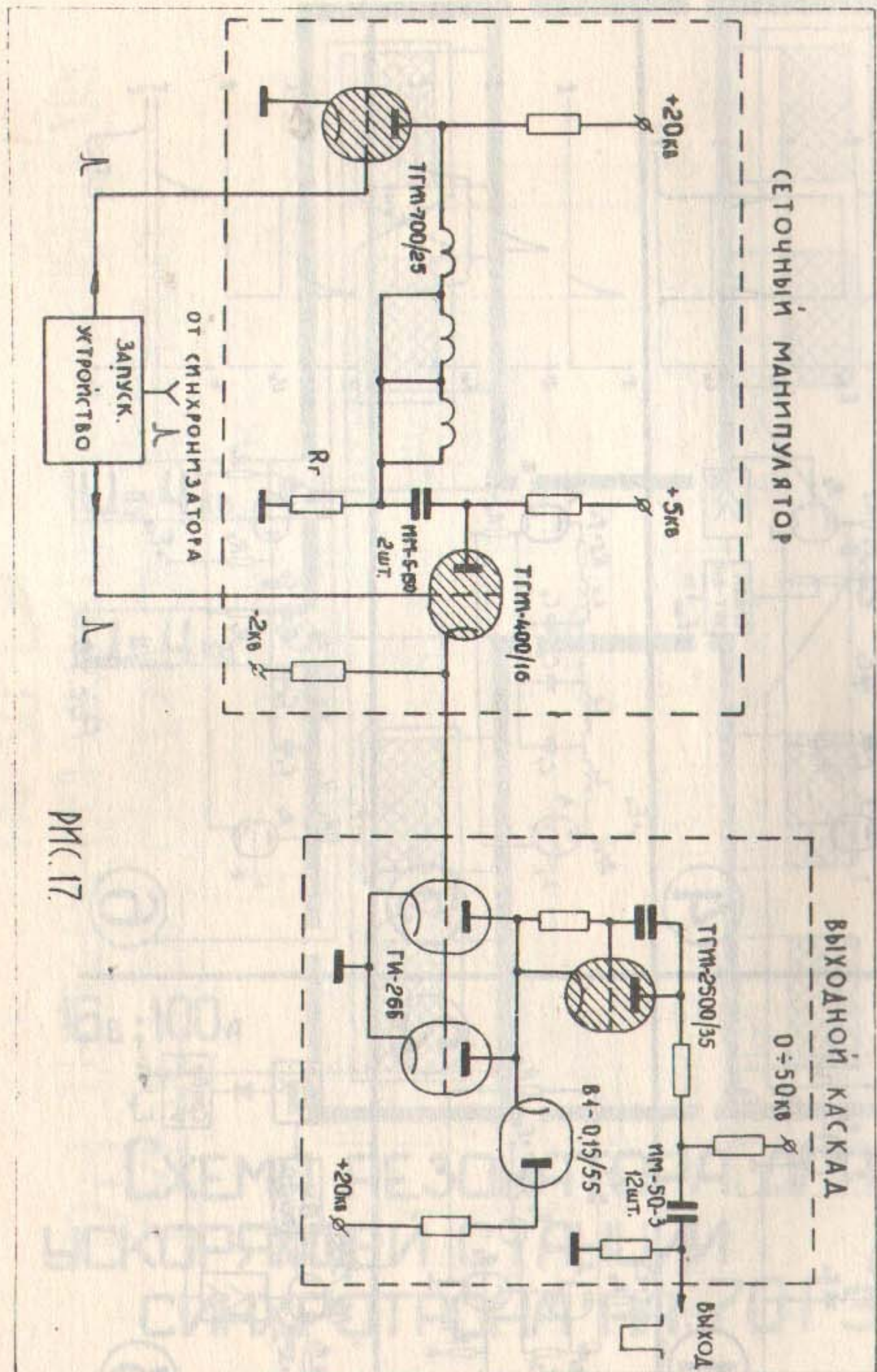


Рис. 17

МОЩНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ МОДУЛЯТОРЫ

| НАЗВАНИЕ, МЕСТО УСТАНОВКИ | Р _ц МГВТ | τ _ц МКСЕК | W КДЖ | U КВ | I _а | F ГЦ | τ _{ср} МКСЕК | ТИП КОММУТАТОРА | ПРИМЕЧАНИЕ |
|---|---------------------|----------------------|-------|------|----------------|------|-----------------------|---|--|
| МОДУЛЯТОР ФИАН | 50 | 1-10 ² | 5 | 4.5 | 1100 | 1 | 0.3 | 2 x ТГМ-265/ПАРАЛ./И ТГМ-1-2500/35/ЛОСЛ./ | ЧАСТИЧНЫЙ РАЗРЯД |
| АНТИПРОТОННЫЙ КАНАЛ СИХРОТРОНА ОИЯИ | 5 | 6-10 ³ | 30 | 23 | 220 | 1/12 | 150 | 2 x ТР 1-40/15 / ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО/ | МОЩСТВЕННАЯ ЛИНИЯ БЕЗ ТР-РА U _{кв} =50KV |
| МОЩНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 14 МЭВ /Нью-Йорк шт./ | 20 | 10 | 0.2 | 250 | 80 | 1/2 | | ВОДОРОДНЫЙ ТИРАТРОН 1754 | МОЩСТВЕННАЯ ЛИНИЯ ТР-Р П-22:1 |
| ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРТЕЛЬ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ "ХИЛЛАК" БЕРКЛИ. | 2.7 | 3-10 ³ | 8 | 20 | 135 | | | 3 ИГНИТРОНА Х3977 | МОЩСТВЕННАЯ ЛИНИЯ ЦЕР-40KV БЕЗ ТР-РА |
| ПРОТОННЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРТЕЛЬ БЕРКЛИ. | 4 | 600 | 2.4 | 14 | 290 | | 15 | ИСКРОВОЙ РАЗРЯДНИК | МОЩСТВЕННАЯ ЛИНИЯ ТР-Р 2:1 |
| ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРТЕЛЬ АРГОНН | 9.1 | 50-500 | 4.5 | 35 | 260 | 1-10 | | ML7560 | ЧАСТИЧНЫЙ РАЗРЯД |
| ИМПУЛЬСНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ БЕТТРОНОВ | ИГН-15 | 0.5 | 6-8 | 50 | | 50 | 2.0 | ТГМ-1-400/16 | МОЩСТВЕННАЯ ЛИНИЯ П-1:10 |
| | ИГН-30 | 0.5 | 6-8 | 50 | | 50 | 2.0 | ТГМ-1-400/16 | ЛИНИЯ П П-1:10 |
| | ИГН-50 | 0.25 | 6-7 | 70 | | 50 | 3.5 | 2xТГМ-1-400/16 | ПОВЫШ. ТР-Р П-1:10.5 |
| ИМПУЛЬСНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ТОКА ДЛЯ БЕТТРОНОВ | ИГТ-15 | 125 | 30 | 5 | 250 | 50 | 120 | ТГМ-1-400/16 | КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ РАЗРЯД ЕМКОСТИ НА ИНДУКТИВНУЮ НАГРУЗКУ |
| | ИГТ-30 | 3.3 | 30 | 11 | 300 | 50 | 120 | 2xТГМ-1-400/16 | |
| | ИГТ-50 | 10.0 | 30 | 15 | 700 | 50 | 150 | ТГМ-1-700/25 и ТГМ-1-400/16 | |

ГИГАНТСКИЕ ПРОТОННЫЕ УСКОРИТЕЛИ / ПРОЕКТНЫЕ ДАННЫЕ /

| НАИМЕНОВАНИЕ УСКОРИТЕЛЯ | КОНЕЧНАЯ ЭНЕРГИЯ | РАДИУС КОЛЬЦА | ЧИСЛО ЧАСТИЦ В ИМПУЛЬСЕ | ЭНЕРГИЯ ИМЖЕКЦИИ |
|----------------------------|------------------|---------------|-------------------------|------------------|
| | ГЭВ | М | | ГЭВ |
| ЦЕРН ^{x)} | 300 | 1200 | 3-10 ¹³ | 8 |
| НИИ ЭФА | 1000 | 2505 | 10 ¹³ | 20 или 70 |
| КИБЕРНЕТИЧЕСКИЙ /1000 ГЭВ/ | 1000 | 3330 | 10 ¹³ | 6 |
| | 1000 | 3330 | | 1 |
| | 1000 | 4110 | | 0.2 |
| КИБЕРНЕТИЧЕСКИЙ /200 ГЭВ/ | 200 | 718 | >10 ¹³ | 0.2 |
| БРУКХЕЙВЕН | 600-1000 | | 10 ¹⁴ | 5-10 |
| БЕРКЛИ ^{x)} | 150-300 | 690 | 3-10 ¹³ | 8 |
| ИТ ЭФАН | 490 | | | 15 |

Данные из докладов на V международной конференции (Фраскати).