



К. 23

7

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

М.М.Карлинер, Е.В.Козырев, И.Г.Макаров,
О.А.Нежевенко, Г.Н.Острейко, Б.З.Персов,
Г.В.Сердобинцев

**СИЛЬНОТОЧНЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ
КОМПЛЕКСА ВЭПП-4.
СИСТЕМА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПИТАНИЯ**

ПРЕПРИНТ 84-110



НОВОСИБИРСК

М.М.Карлинер, Е.В.Козырев, И.Г.Макаров, О.А.Нежевенко,
Г.Н.Острейко, Б.З.Персов, Г.В.Сердобинцев

СИЛЬНОТОЧНЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ КОМПЛЕКСА ВЭПП-4.
СИСТЕМА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПИТАНИЯ

А Н Н О Т А Ц И Я

Описано устройство и приведены параметры мощного импульсного гирокон — источника высокочастотной энергии для возбуждения линейного ускорителя электронов комплекса ВЭПП-4. Отмечены особенности работы гирокон в переходном режиме при различных способах связи его с ЛУ. Изложена методика настройки гирокон, приведены его нагрузочные характеристики.

Для обеспечения необходимой светимости в накопителе ВЭПП-4 /1/ в 1974 г. было решено получать позитроны путем конверсии электронов, ускоренных в линейном ускорителе до 50 МэВ. Полученные позитроны с энергией несколько МэВ инжектируются в синхротрон Б-4, далее в накопитель ВЭПП-3, а затем в ВЭПП-4. Необходимый темп накопления позитронов при однооборотной инъекции в синхротрон Б-4 (время инъекции ~ 30 нсек) достигается при токе электронного пучка на мишени /2/ 20+40 А. Таким образом мощность ускоренного пучка составляет 1000+2000 МВт, что само по себе предполагает работу электронного ускорителя (ЛУ) в режиме с большой накопленной энергией. Кроме того, очевидно, что накопление необходимой энергии в ускорителе при минимальном ее потреблении от источника питания требует сокращения времени накопления и увеличения мощности источника ВЧ энергии /3/ .

Для получения электронного пучка с указанными параметрами был разработан и построен сильноточный линейный ускоритель, а в качестве источника ВЧ мощности создан импульсный гирокон /4/ мощностью 65 МВт, который с 1978 г. работает в составе комплекса ВЭПП-4. Описание этого гирокон вместе с волноводным трактом для передачи ВЧ энергии в ЛУ и составляет предмет настоящей работы.

Конструктивная схема импульсного гирокон изображена на рисунке 1.

Электронный пучок, сформированный в ускорителе ЭЛИТ-3А-1 /5/, попадает в цилиндрический резонатор круговой развертки-2. Поперечное высокочастотное магнитного поле в приосевой области резонатора имеет круговую поляризацию (тип колебаний E_{110}) и отклоняет пучок на угол $\sim 5^\circ$. Далее, электроны, проходя в области магнитного поля первой отклоняющей системы-3 (ОС-1), отклоняются на больший угол, а затем во второй отклоняющей системе - 4 (ОС-2) направляются в кольцевую щель выходного резонатора - 5. Релятивистские электроны возбуждают в выходном резонаторе бегущую по азимуту электромагнитную волну (тип H_{110}) и тормозясь в электрическом поле, отдают свою энергию. Через нижнюю кольцевую щель электроны покидают выходной резонатор и собираются коллектором - 6. Высокочастотная мощность выводится из выходного резонатора через отверстия связи, сдвинутые по

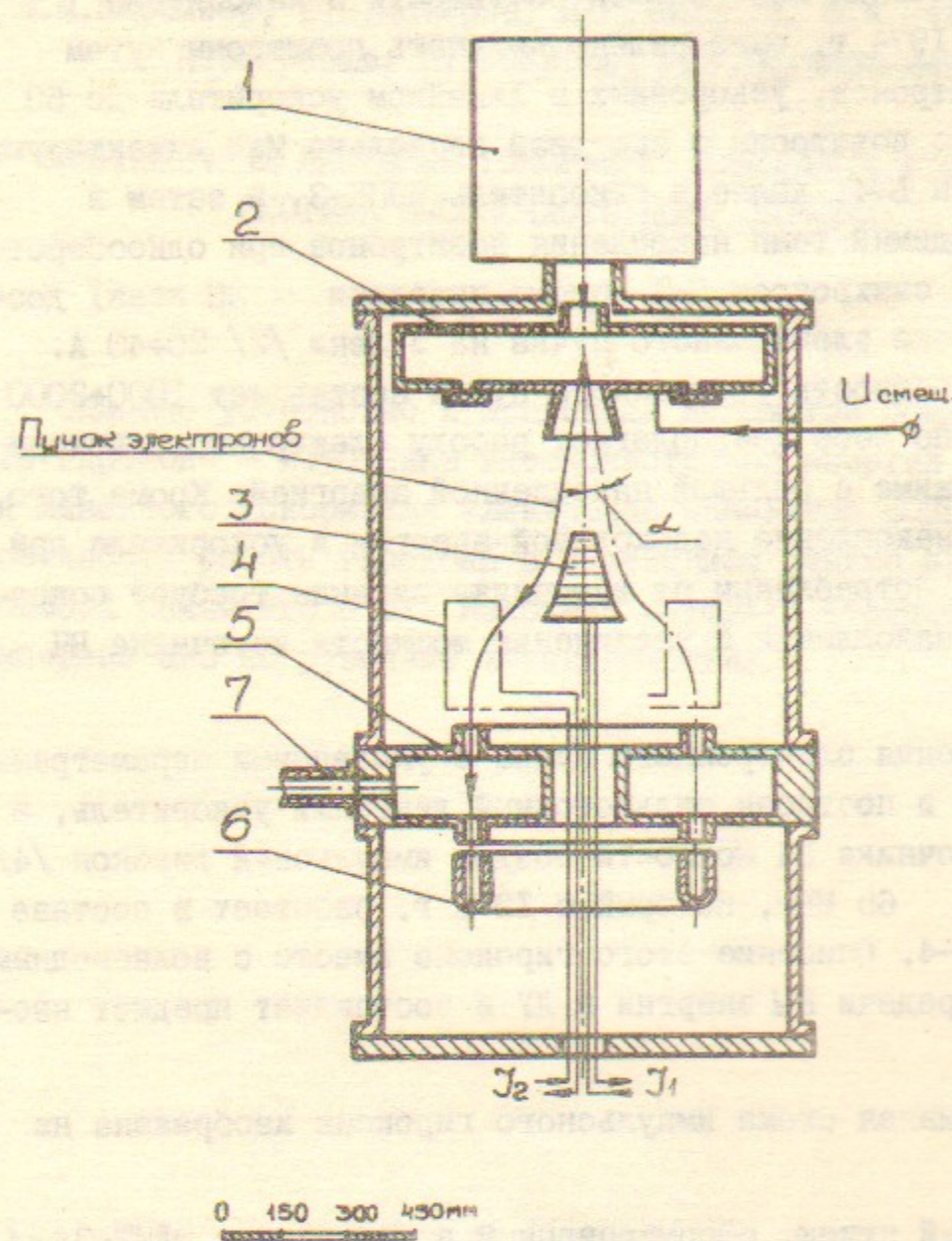


Рис.1. Конструктивная схема импульсного гирокона.

- 1 - источник электронов; 2 - резонатор развертки;
 3 - первая отклоняющая система (ОС-1); 4 - вторая отклоняющая система (ОС-2); 5 - выходной резонатор;
 6 - коллектор; 7 - вывод высокочастотной энергии.

азимуту на 90° , двумя волноводами - 7.

Для диагностики параметров пучка, сформированного источником - 1 в гироконе предусмотрены два пробника. Первый расположен на входе в резонатор развертки, второй - между резонатором развертки и первой отклоняющей системой.

Источники питания элементов гирокона выполнены на базе

разработанных в Институте унифицированных импульсных генераторов напряжения и источников постоянного тока и напряжения /6/. Управление ими и контроль параметров осуществляется автоматизированной системой на основе ЭВМ *СТРА-1325* /7/. Она обеспечивает по команде с алфавитно-цифрового дисплея включение всех устройств в заданный режим, изменение режима и контроль текущего состояния установки. Кроме того, на гироконе контролируются уровни ВЧ сигналов после их детектирования, а также токооседание в электроннооптическом тракте. Исследование функциональных зависимостей и оптимизация режимов производится также с помощью ЭВМ. Изменение режимов питания и измерительных элементов осуществляется дискретно с минимальным шагом по амплитуде 0,1% и по времени 0,1 мсек.

На рис.2 изображена временная диаграмма, поясняющая работу установки.

Канал транспортировки пучка между ЭЛИТ-3А и резонатором развертки включает в себя ламельный пробник и фокусирующую линзу. Ламельный пробник имеет четыре плоских изолированных графитовых ламели, которые образуют контур с отверстием для прохождения пучка в центре, диаметром 40 мм. Пробник позволяет контролировать размер и положение электронного пучка на входе в резонатор развертки по токооседанию на ламелях. Фокусирующая линза выполнена в виде соленоида (25 витков, средний диаметр 84 мм), отделенного от вакуумной камеры канала тонкой трубой из нержавеющей стали и обеспечивает на оси канала магнитную индукцию ~ 2 кГс при токе в обмотке 400 А. Фокусное расстояние при энергии электронов 1,6 МэВ равно 0,16 м.

Резонатор развертки схематически изображен на рис.3. Конструкция предусматривает: два ввода мощности - 4, расположенные на обечайке - 2 и сдвинутые по азимуту на 90° ; два стержня настройки частоты - 12, установленные напротив вводов мощности; четыре компенсатора неоднородности резонатора - 11 и четыре датчика напряжения - 13, размещенные на верхней торцевой крышке. Электрический контакт торцевых стенок с обечайкой обеспечивается индиевой прокладкой. Исследования переходного контакта медь-индий-медь показали /8/, что при значительно меньших усилиях в соединении такой контакт обладает меньшим удельным сопротивлением по сравнению с контактом медь-медь.

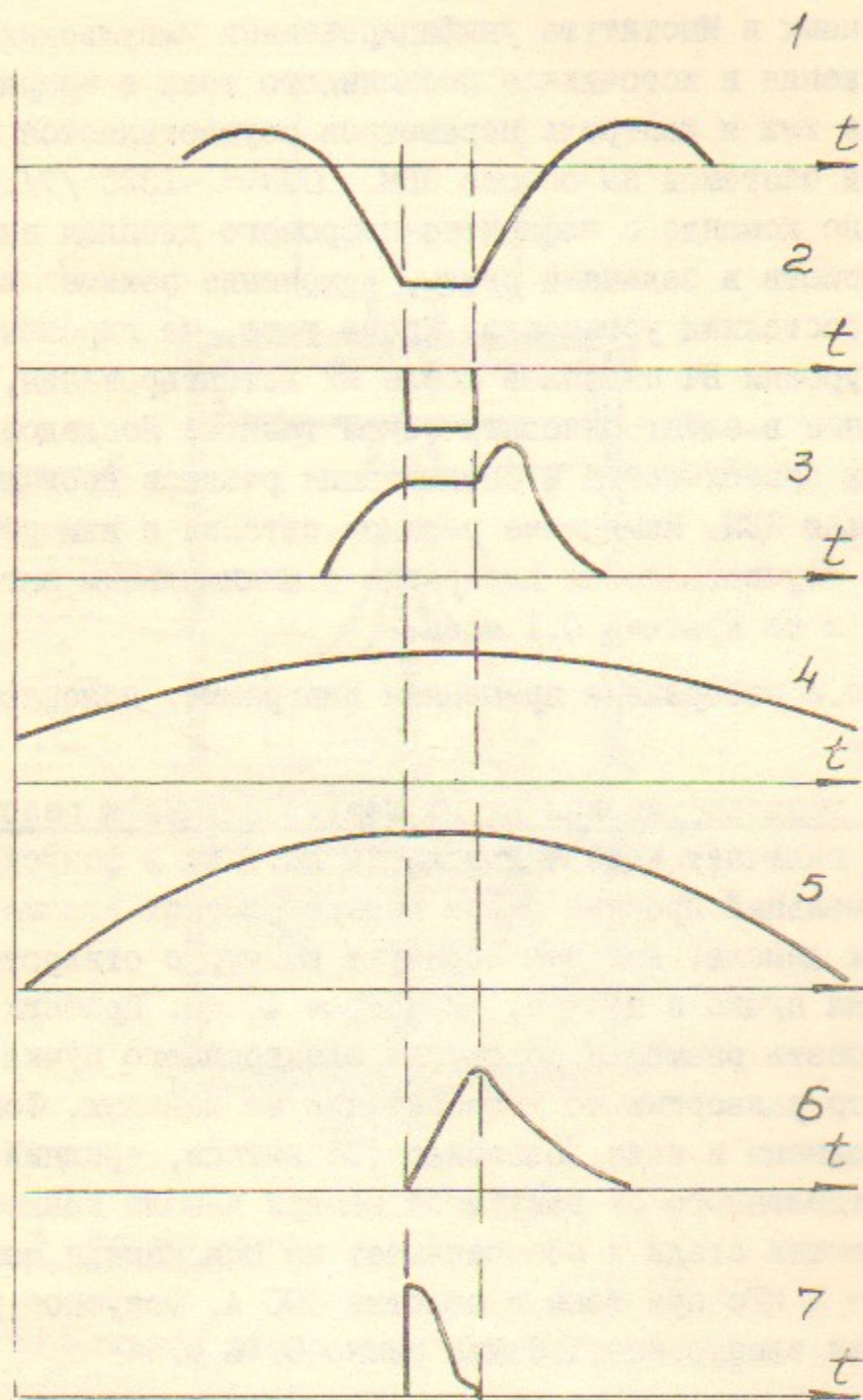


Рис.2. Временная диаграмма и форма импульсов:
 1 - ускоряющего напряжения источника электронов; 2 - тока пучка; 3 - напряжения на резонаторе развертки; 4,5 - магнитных полей ОС-1 и ОС-2; 6 - напряжения на выходном резонаторе; 7 - тока пучка, прошедшего в коллектор.

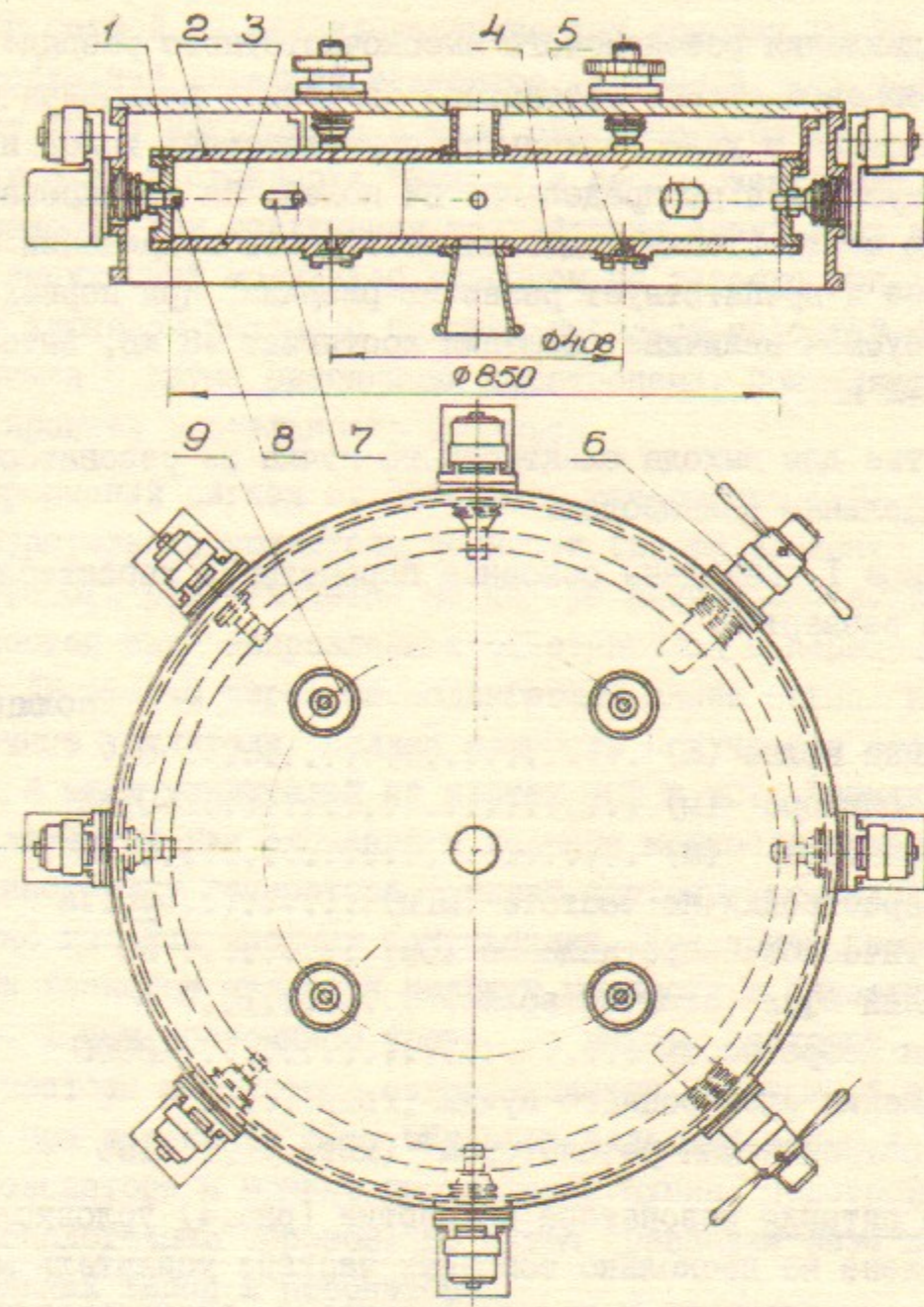


Рис.3. Резонатор развертки.
 1 - обечайка; 2 и 3 - торцевые стенки, 4 - внутренний диск нижней торцевой стенки, 5 - изолятор, 6 - ввод мощности, 7 и 8 - подстройка частоты и компенсатор неоднородностей, 9 - емкостной датчик напряжения.

Вводы мощности выполнены в виде петель, индуктивность которых компенсирована емкостью на рабочей частоте. Петли отделены от вакуумного объема керамическими колпаками. Это дает возможность исключить РВР во вводах, а также оперативно менять гео-

направляется перпендикулярно торцевым стенкам выходного резонатора. Пронизываемые пучком поверхности образованы проволочными перемычками, симметрично расположенными по азимуту. Конструктивная прозрачность каждой такой поверхности для электронного пучка составляет 97.5%.

Геометрия и местоположение отклоняющих систем выбирались по результатам численных расчетов траекторий электронов. Задача состояла в том, чтобы спроектировать такую отклоняющую систему, которая вписывалась в заданные конструктивные размеры гирокона и обеспечивала проводку пучка в коллектор с минимальными потерями тока при заданных параметрах пучка (диапазон рабочей энергии электронов $I500+I600$ кэВ, ток 40-50 А).

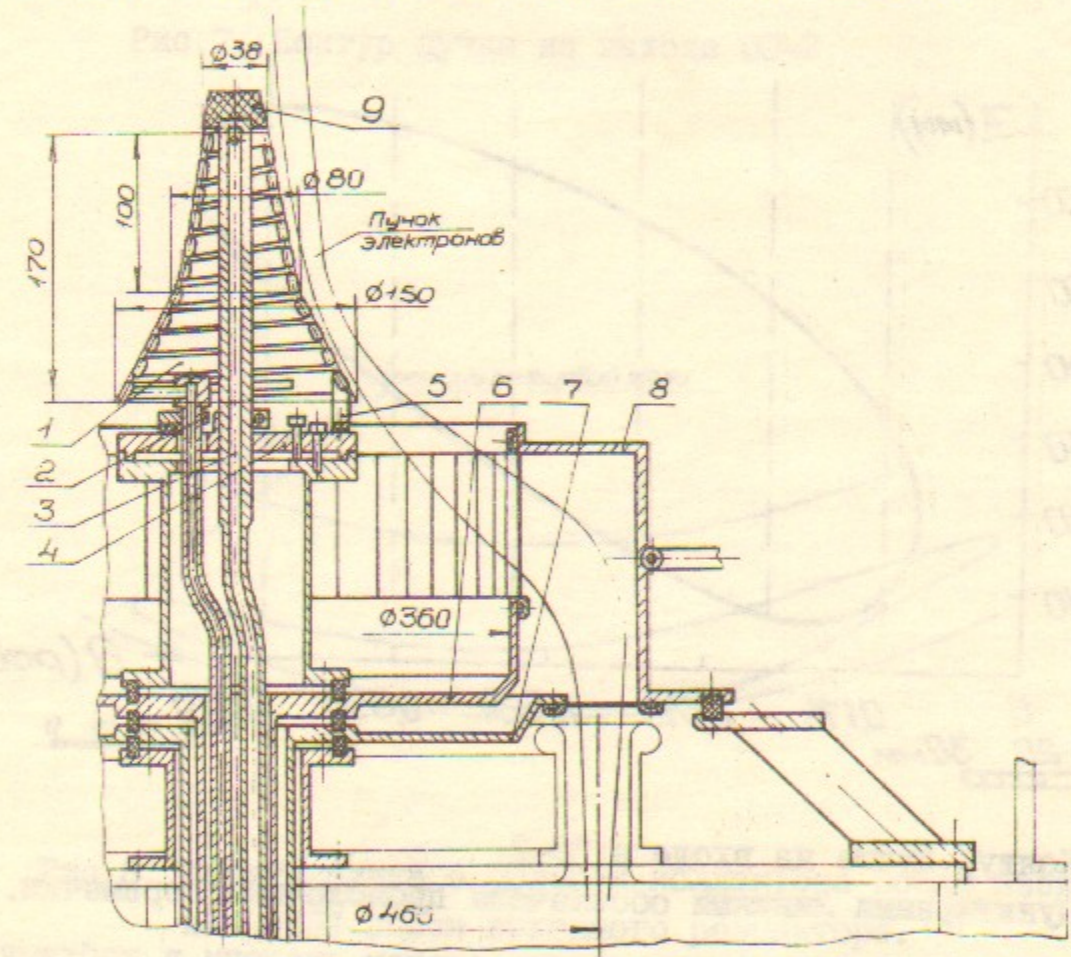


Рис.5. Блок отклоняющих систем.

- 1 - конусный соленоид (ОС-1); 2,3,6,7 - токоподводы;
- 4 - опорный фланец; 5 - крепление нижнего витка соленоида; 8 - охлаждаемый токоведущий корпус ОС-2;
- 9 - защитный графитовый колпачок.

Оптимизация геометрии и взаимного расположения отклоняющих систем производилась по результатам расчетов траекторий гранич-

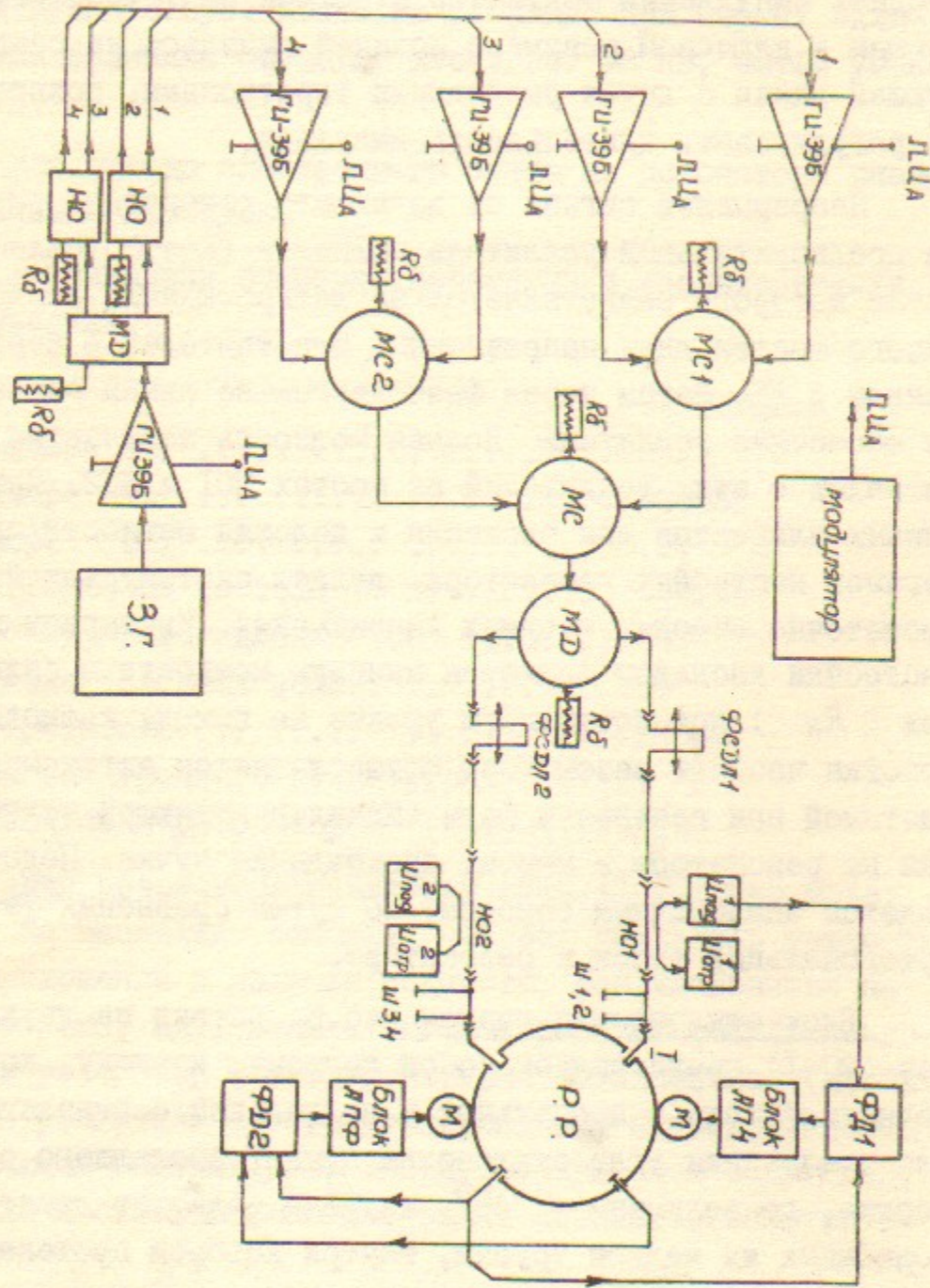


Рис.4. Схема ВЧ усилителя мощности для возбуждения резонатора развертки.

ных электронов. При численном моделировании учитывалась неоднородность магнитного поля вблизи поверхностей второй отклоняющей системы, образованных проволочными перемычками, а также расфокусировка пучка в выходном резонаторе в процессе взаимодействия с ВЧ полем, возбуждаемой в нем бегущей волны.

Расчеты показали, что при выбранной геометрии блока отклоняющих систем суммарное токооседание в электроннооптическом тракте не превышает 6%.

На рисунках 6,7,8 изображены контуры пучка при пересечении поверхностей, образованных проволочными перемычками и плоскости нижней торцевой стенки выходного резонатора.

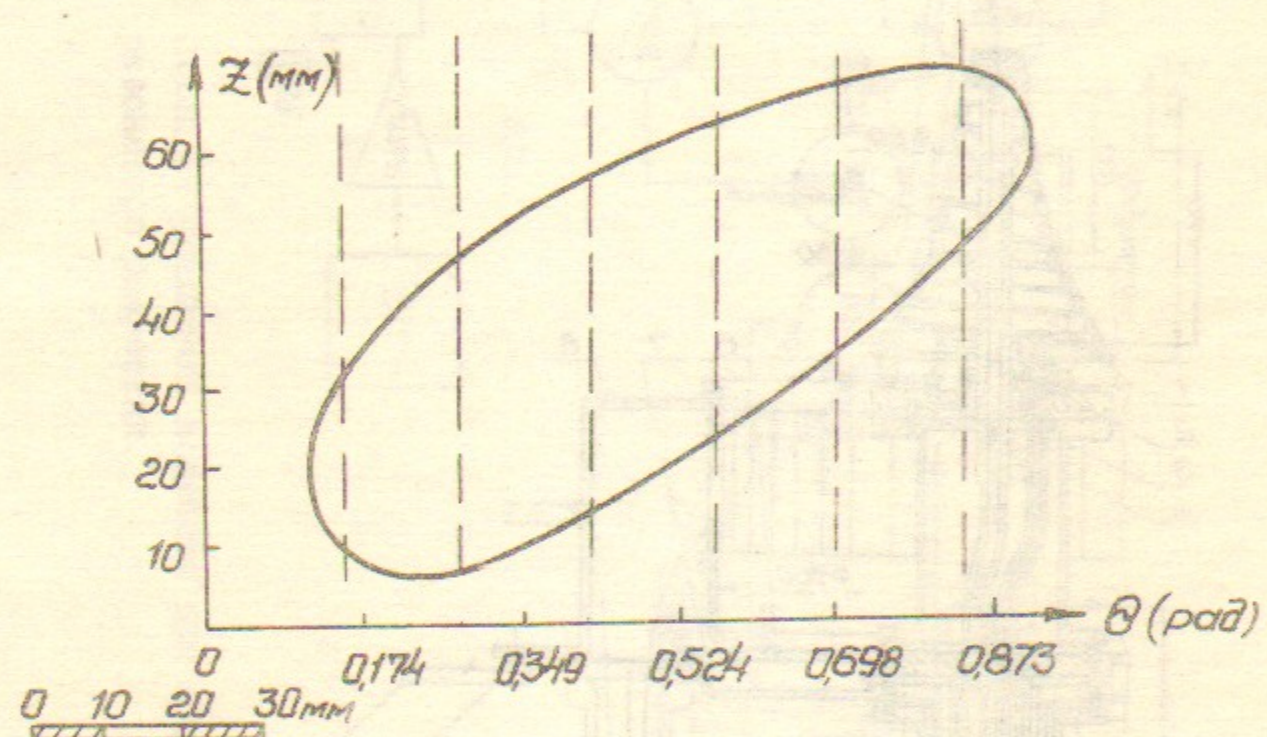


Рис.6. Контур пучка на входе в ОС-2.

Пунктирными линиями обозначены проволочные перемычки.

Основные параметры отклоняющих систем сведены в таблицу 2.

	I питания (кА)	$\mathcal{E}_{\text{анод.пит.}}$ (кВ)	$\mathcal{H}_{\text{откл.сист.}}$ (Гн)	$N_{\text{зан.}}$ (Дж)
ОС-1	30	350	$5,4 \cdot 10^{-6}$	25
ОС-2	38	200	$7,0 \cdot 10^{-8}$	50

В качестве альтернативного варианта рассматривался блок отклоняющих систем (рис.9) с азимутальными токами /10/. Было

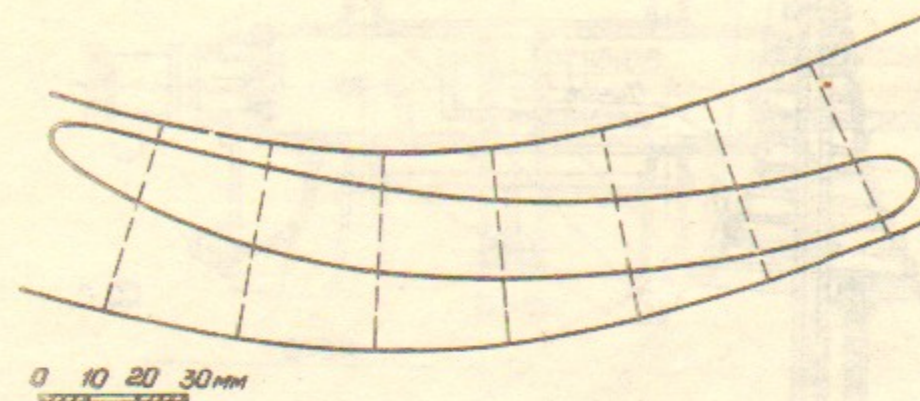


Рис.7. Контур пучка на выходе ОС-2.

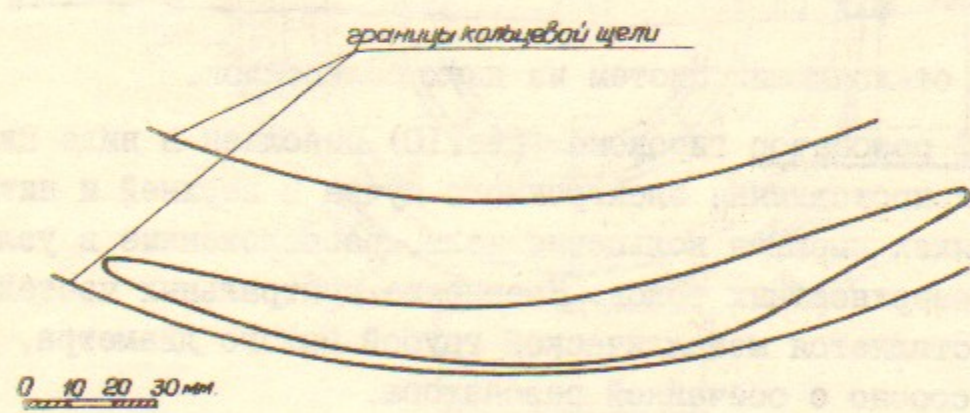


Рис.8. Контур пучка в области коллектора после взаимодействия с ВЧ полем выходного резонатора.

установлено, что применение квазистационарного питания второй отклоняющей системы не позволяет получить удовлетворительную оптику пучка без усложнения конструкции (например, постановка линз на входе в выходной резонатор). Применение же источника постоянного тока хотя и дает удовлетворительные результаты по прохождению пучка в коллектор, тем не менее, они оказываются хуже, чем в случае комбинированного варианта блока отклоняющих

систем (рис.5).

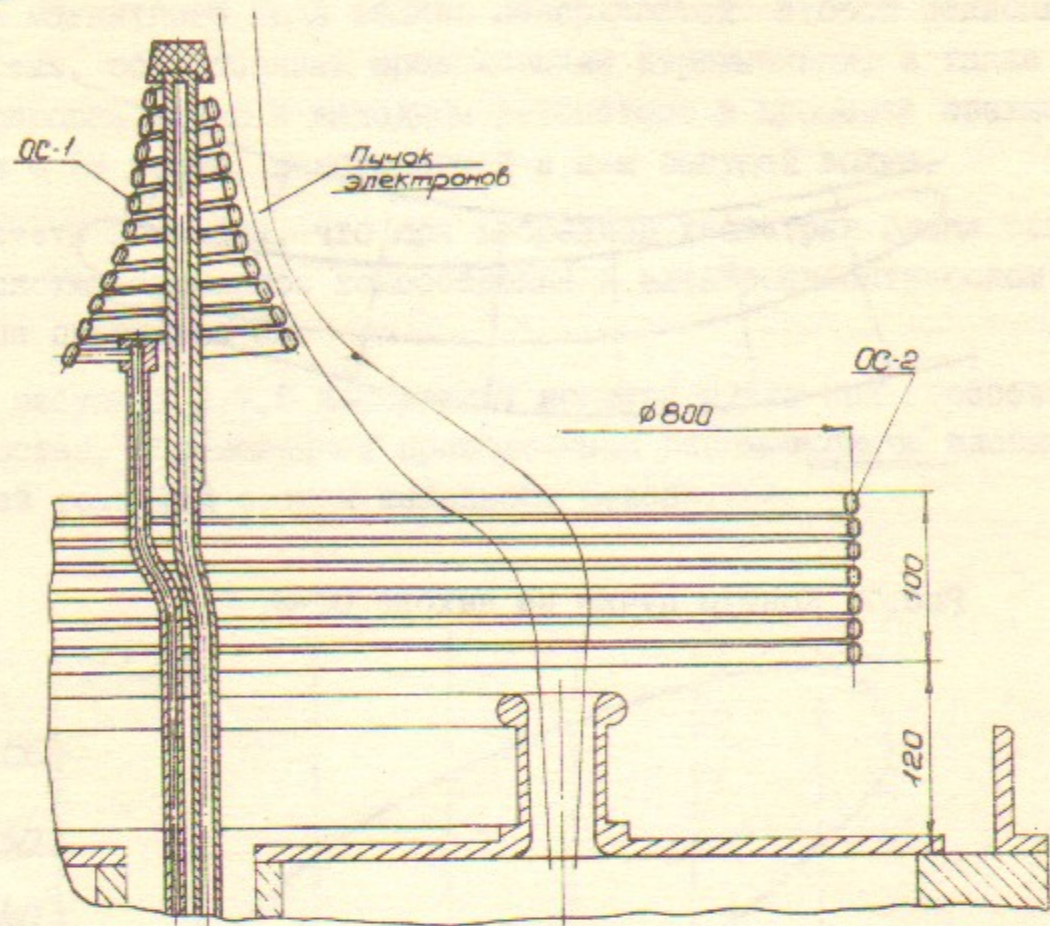


Рис.9. Блок отклоняющих систем из двух соленоидов.

Выходной резонатор гирокона (рис.10) выполнен в виде цилиндра /II/. Для прохождения электронного пучка в верхней и нижней торцевых стенках имеются кольцевые щели, расположенные в узлах радиальных поверхностных токов. Крепление центральных частей стенок осуществляется металлической трубой малого диаметра, установленной соосно с обечайкой резонатора.

Измерения параметров резонатора после его монтажа в установке показали, что за счет излучения через кольцевые щели, возникает сильная связь резонатора с внешними полостями. Это приводит к падению добротности с $Q_0 = 17000$ до $Q_0 \sim 3000$. С целью уменьшения излучения кольцевые щели в торцевых стенках были снабжены заградительными волноводами, замкнутыми на концах металлическими перемычками, равномерно расположенными по азимуту. Прозрачность обеих поверхностей для электронного пучка составляет 99%, а нагрев перемычек при работе в импульсном режиме мал. Другой способ ослабления излучения из щелей — четвертьволновая ловушка /12/, пример устройства которой приведен на рис. 11, имеет более сложное конструктивное исполнение и может при-

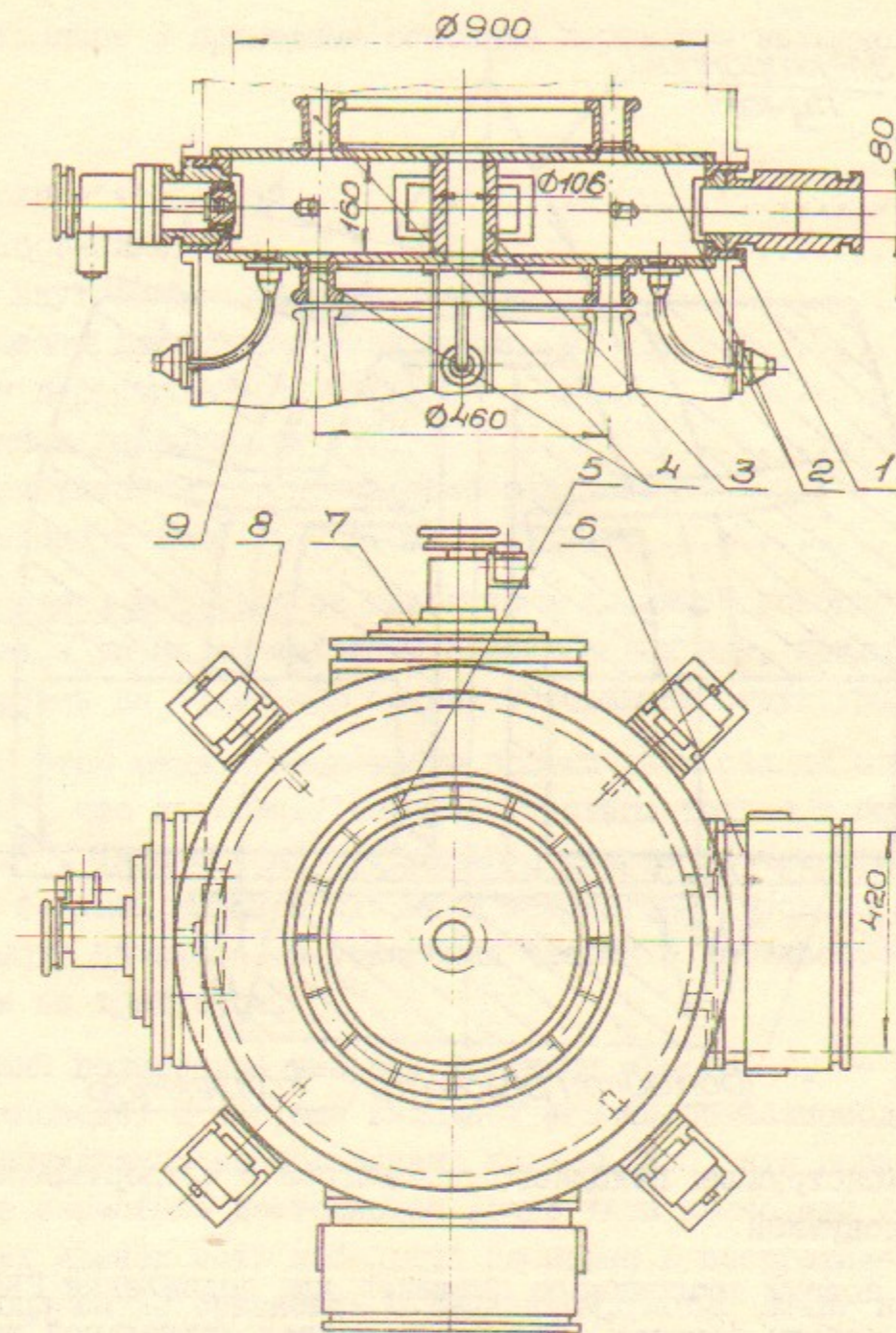


Рис.10. Выходной резонатор.

1 — обечайка; 2 — торцевые стенки; 3 — внутренний цилиндр; 4 — заградительные волноводы; 5 — металлические перемычки; 6 — вывод энергии; 7,8 — механизмы подстройки частоты и компенсации неоднородностей; 9 — емкостной датчик напряжения.

меняться при создании гироконов большой средней мощности. Эксперименты, проводившиеся на модели, показали, что ослабление излучения составляет > 20 дБ.

В конструкции выходного резонатора не предусмотрена воз-

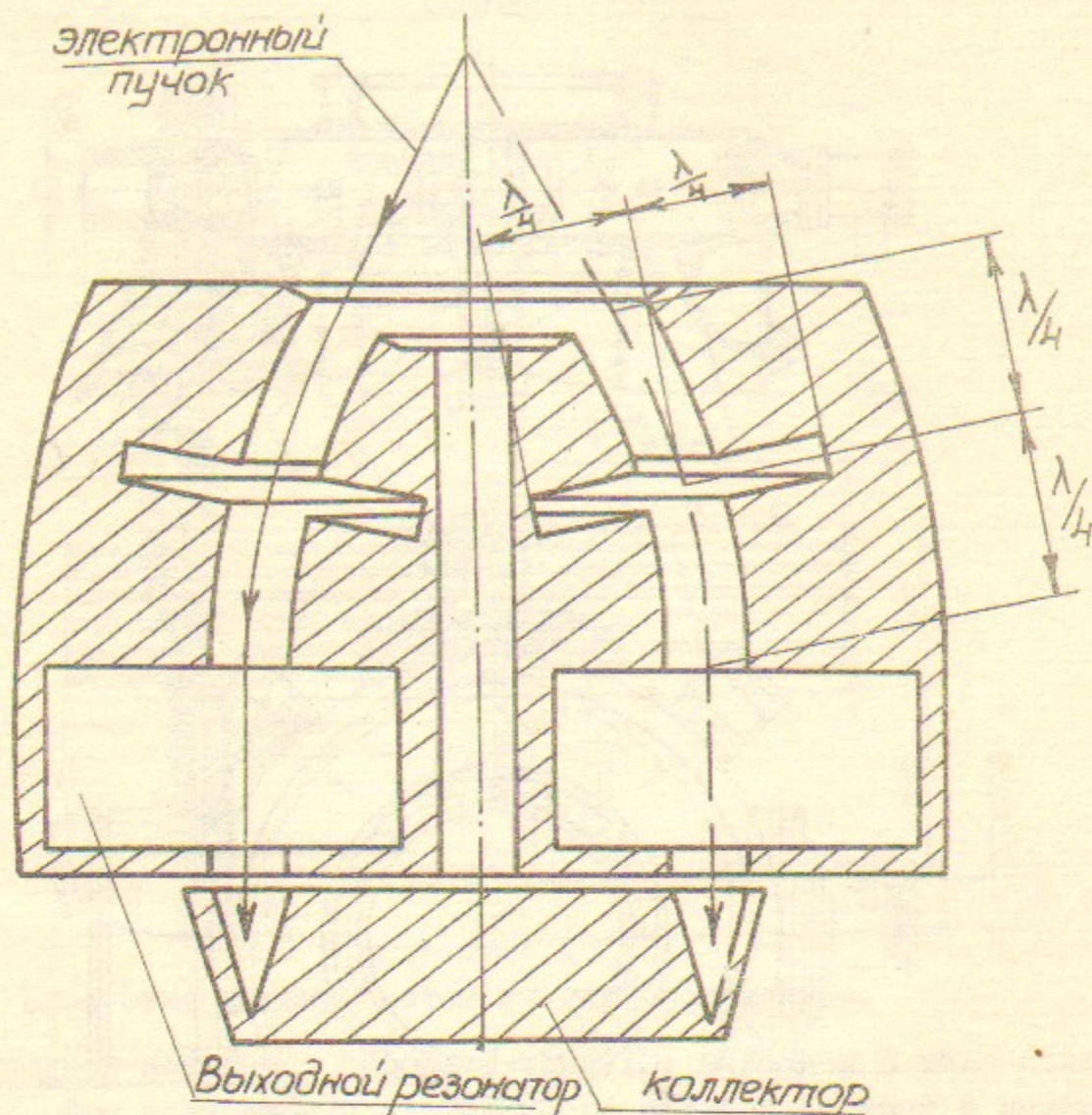


Рис. II. Конструкция выходного резонатора с четвертьволновой ловушкой.

возможность подачи постоянного смещения для подавления РВР. Однако, опыт работы показал, что после непродолжительной тренировки трудностей в прохождении зон высокочастотного разряда не возникает.

Оперативная перестройка частоты производится плунжерами, расположенными на обечайке, против окон связи с волноводами. Окна связи сдвинуты по азимуту на 90° , чтобы вносимые ими возмущения не нарушали бегущую в резонаторе волну.

Компенсация неоднородностей выходного резонатора осуществляется, также как и в резонаторе развертки, четырьмя подвижными штырями на обечайке. Для контроля напряжения на нижней торцевой стенке имеются четыре емкостных датчика.

В таблице 3 приведены основные параметры выходного резонатора.

Таблица 3	
Высота резонатора (м)	0.16
Диаметр обечайки (м)	0.9
Диаметр внутреннего цилиндра (м)	0.100
Ширина щелей для прохождения пучка (м)	0.04
Диапазон перестройки по частоте (МГц)	$\pm 0,6$
Собственная добротность	17000
Характеристическое сопротивление резонатора при колебаниях типа E_{110} (Ом)	52

Передача мощности от гирокон в линейный ускоритель осуществляется двумя волноводами одинаковой длины, каждый из которых нагружен на отдельную секцию ускоряющей структуры.

При этом между ускоряющими полями двух секций сдвиг фаз равен 90° , что позволяет ускорять частицы только в одном направлении^{*}). Такая схема максимально проста и обеспечивает сохранение бегущей волны в выходном резонаторе гирокон во время переходного процесса, а ускорения частиц в противоположном направлении не требуется.

Длины волноводов выбраны кратными $\lambda_g/2$ (λ_g — длина волны в волноводе) и система выходной резонатор-волновод-ускоритель возбуждается на колебаниях вида $\pi/2$, что позволяет реализовать известные достоинства этого типа колебаний [13]. Хотя, при таких длинах есть небольшой проигрыш в энергетике переходного процесса по сравнению с вариантом, когда длины волноводов кратны $(\lambda_g/4)(2n+1)$ (см. приложение), но есть и преимущества: более благоприятные условия работы с точки зрения электрической прочности, возможность работы в слабоперенапряженном режиме (т.е.

^{*}) На рис. I2 схематически изображен гирокон с двумя выходными резонаторами, настроенными так, что пучок возбуждает в каждом из них стоячую волну. Замена одного резонатора с бегущей волной на два со стоячей позволяет получать в них колебания с произвольным сдвигом по фазе, который определяется расстоянием между резонаторами — L и скоростью электронов. Если $L = (2n+1)\beta\lambda/4$; где $\beta = v/c$, λ — длина волны и n — целое число, то сдвиг фаз между колебаниями в резонаторах будет равен 0 или π . В этом случае принципиально возможно питать от гирокон без особых затруднений резонаторы, предназначенные для ускорения частиц в противоположных направлениях (например, резонаторы электрон-позитронных накопителей).

более устойчивом к изменению нагрузки), меньшие размеры окон связи.

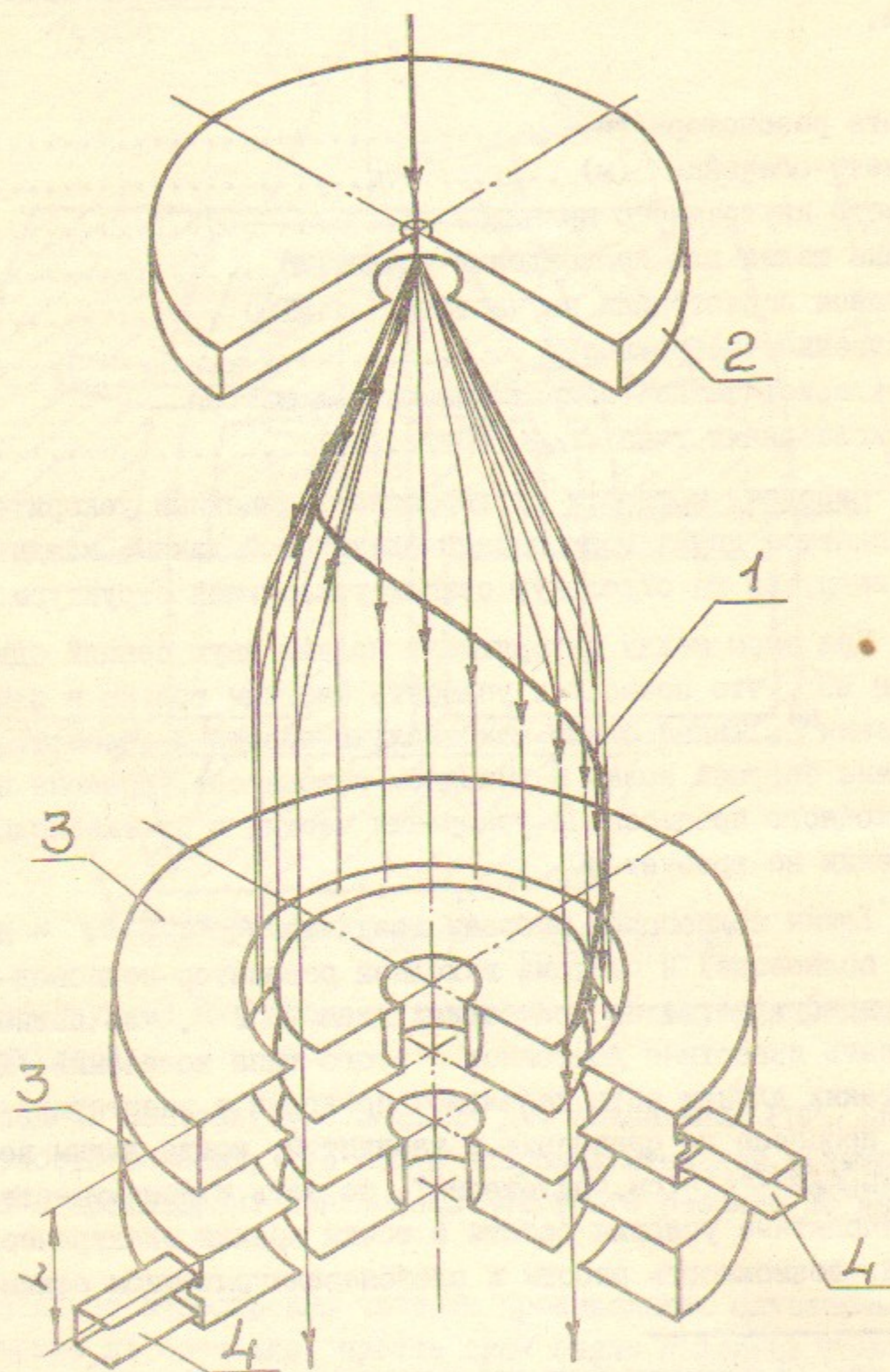


Рис. 12. Гирокон с двумя выходными резонаторами.
1 - мгновенное положение пучка; 2 - резонатор развертки;
3 - выходной резонатор; 4 - вывод энергии.

Конструктивно выходной резонатор, ускоритель и волноводы образуют единый вакуумный объем.

В таблицу 4 сведены основные параметры волноводного тракта.

Таблица 4	
Размер волновода (m^2)	0.42x0.08
Размер окна связи с выходным резонатором (m^2) ..	0.146x0.08
Размер окна связи с ускоряющей секцией (m^2) ..	0.155x0.08
Характеристическое сопротивление волновода (Ом) IO	
Добротность волновода, Q_0	5000
Характеристическое сопротивление ускоряющей секции (IO резонаторов) (Ом)	20
Добротность ускоряющей секции, Q_0^y	20000
Коэффициент связи с выходным резонатором (%) ...	0.63
Коэффициент связи с ускорителем (%)	0.22

Настройка установки включает в себя получение наилучшего токопрохождения в коллектор гирокона при расстроенном выходном резонаторе и, затем, подбор связи с ЛУ для достижения максимального ускоряющего напряжения.

Оптимизация токопрохождения в коллектор проводилась путем настройки круговой поляризации, подбора амплитуды отклоняющего ВЧ поля в резонаторе развертки и режимов элементов электронно-оптического тракта гирокона.

Качество круговой поляризации определялось вращающейся петлей, которая помещалась в центре верхней торцевой стенки резонатора развертки, а настройка производилась компенсаторами неоднородности. В результате настройки получается поляризация, отличающаяся от круговой не более чем на $\pm 1\%$.

Экспериментальная зависимость полного заряда (q) (прошедшего в коллектор) от режимов основных элементов гирокона приведена на рис. 13. Заряд (q_0), прошедший в оптимальном режиме, принят за 1. Максимальное токопрохождение составило 90% от импульсного тока (заряда) ЭЛИТ-3А. Нестабильности источников питания элементов гирокона не превосходят $\pm 2 \cdot 10^{-3}$, что обеспечивает хорошую повторяемость прохождения пучка в коллектор. В дальнейшем, при эксплуатации гирокона на комплексе ВЭП-4, корректировка настройки его не требуется.

Эксплуатационные характеристики источника электронов ЭЛИТ-3А и гирокона приведены в таблицах 5 и 6 соответственно

Таблица 6

Рабочая длина волны	см	70
Выходная мощность гирокона	МВт	65
Коэффициент усиления	дБ	26
Токопрохождение через электронно-оптический тракт гирокона	%	90
К П Д	%	75

Подбор коэффициента трансформации, обеспечивающего максимальное ускоряющее напряжение производился изменением размеров отверстий связи волноводов с ускоряющей структурой и выходным резонатором (грубая настройка). Более точная подстройка коэффициента трансформации без нарушения вакуума в установке, осуществлялась изменением резонансной частоты волноводов.

Экспериментальная зависимость изменения коэффициента трансформации (n/n_{max} , $n_{max} \approx 1.6$) и ускоряющего напряжения (U_{ay}/U_{ay}^{max} , $U_{ay}^{max} = 3.3$ МВ) от настройки волновода приведена на рис.14. Резонансная частота волновода изменялась внесением металлического штыря в пучность электрического поля.

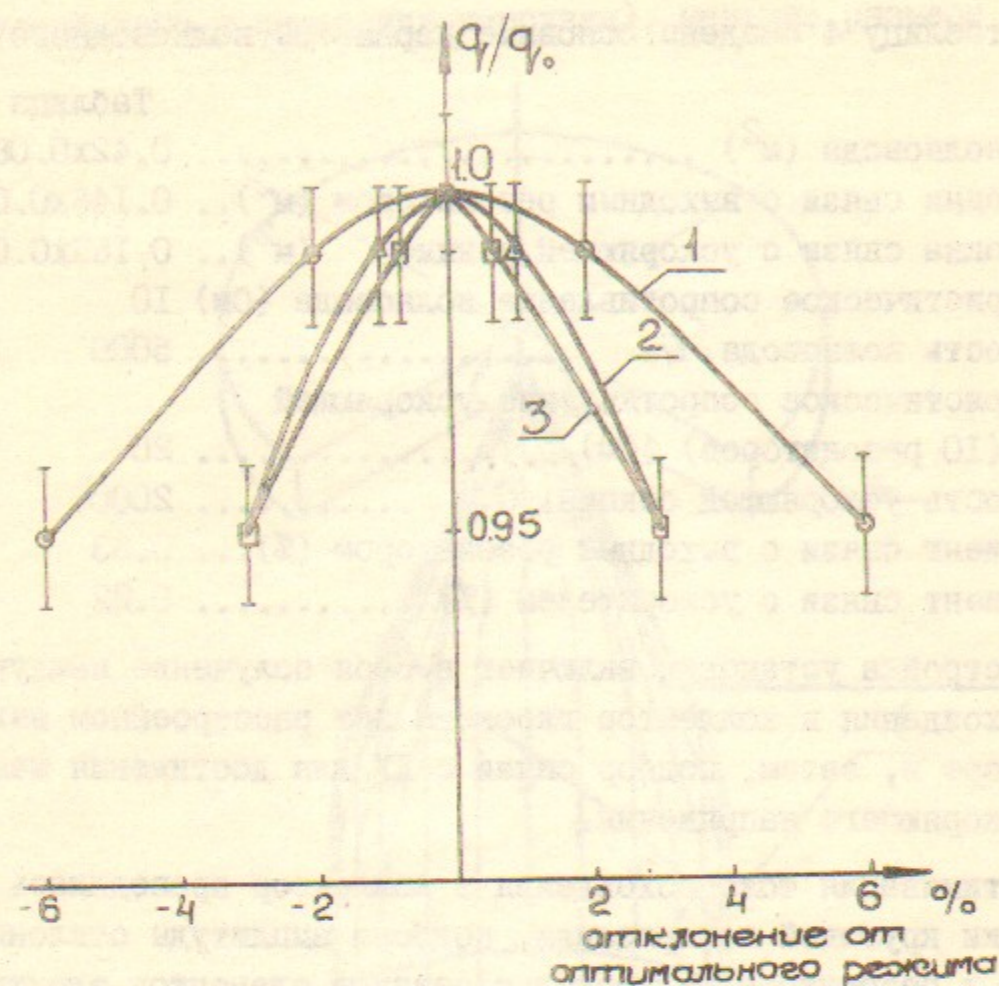


Рис.13. Зависимость полного заряда, прошедшего в коллектор гирокона, от режимов основных элементов его электронно-оптического тракта.

Кривая 1 характеризует отношение q/q_0 от отклонения ВЧ поля резонатора развертки от оптимального, 2 - от кинетической энергии электронов пучка ЭЛИТ-3А, 3 - от магнитного поля первой и второй отклоняющих систем.

Таблица 5

Кинетическая энергия электронов	МэВ	1.6
Ток пучка импульсный	А	52
Длительность импульса	мксек	12
Частота следования импульсов	Гц	1
Энергия пучка	кДж	1

Нагрузочные характеристики гирокона и особенности работы его в переходном режиме на резонансную нагрузку

Рассматривая упрощенную модель аксиального выходного резонатора гирокона, возбуждаемого тонким электронным пучком и полагая, что пучок входит в резонатор с оптимальным углом и в оптимальной фазе φ_4 , можно выделить три режима работы гирокона, отличающиеся напряжением в пролетном зазоре резонатора. Первый режим – недонапряженный, осуществляется при напряжении ниже критического ($U_H < 1$, $U_H = U_p / U_0$, U_p – напряжение на зазоре, U_0 – оптимальное напряжение, при котором происходит полное торможение электронов к концу пролета выходного резонатора). В этом случае электроны пролетают зазор в одном направлении. Во втором режиме $U_H > 1$, но электроны, хотя, и совершают осцилляции в зазоре, выходят из него или оседают на нижнюю торцевую стенку. Наконец, в третьем режиме электроны испытывают полное торможение внутри резонатора и выбрасываются из зазора через входную кольцевую щель или оседают на верхнюю торцевую стенку.

В качестве примера на рисунках 15 и 16 изображены траектории электронов и зависимость электронного КПД для различных значений U_H , полученные численным интегрированием уравнений движения (начальная энергия электронов 1,5 МэВ, $U_0 = 1.62$ МВ). Отличие η_e от 1 (рис.16) при $U_H = 1$ объясняется тем, что при расчетах фаза влета электронов в поле выходного резонатора несколько отличалась от оптимальной. Экспериментально зависимость η_e от напряжения на выходном резонаторе наблюдалась при запуске импульсного гирокона, когда он не был связан с линейным ускорителем, а U_p достигало величины $\sim 2U_0$.

Приближенные аналитические оценки зависимости электронного КПД от напряжения при релятивистских энергиях электронов дают результат, хорошо согласующийся с численными расчетами (пунктирная линия на рис.16) и могут быть записаны следующим образом:

$$\eta_e = 1 \pm (1 - U_H) = \begin{cases} U_H & 0 \leq U_H \leq 1 \\ 2 - U_H & 1 \leq U_H \leq 2 \end{cases} \quad (1)$$

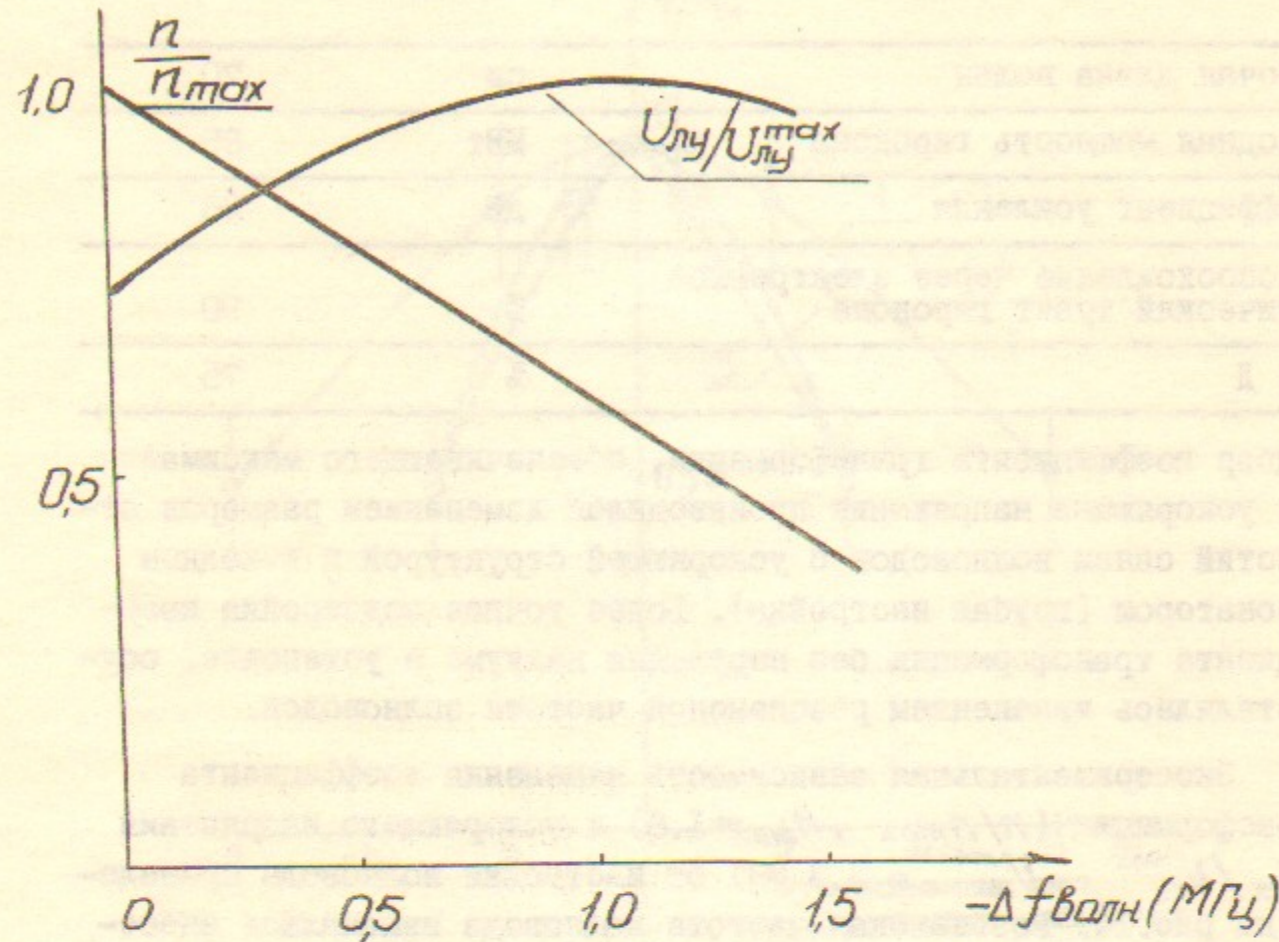


Рис.14

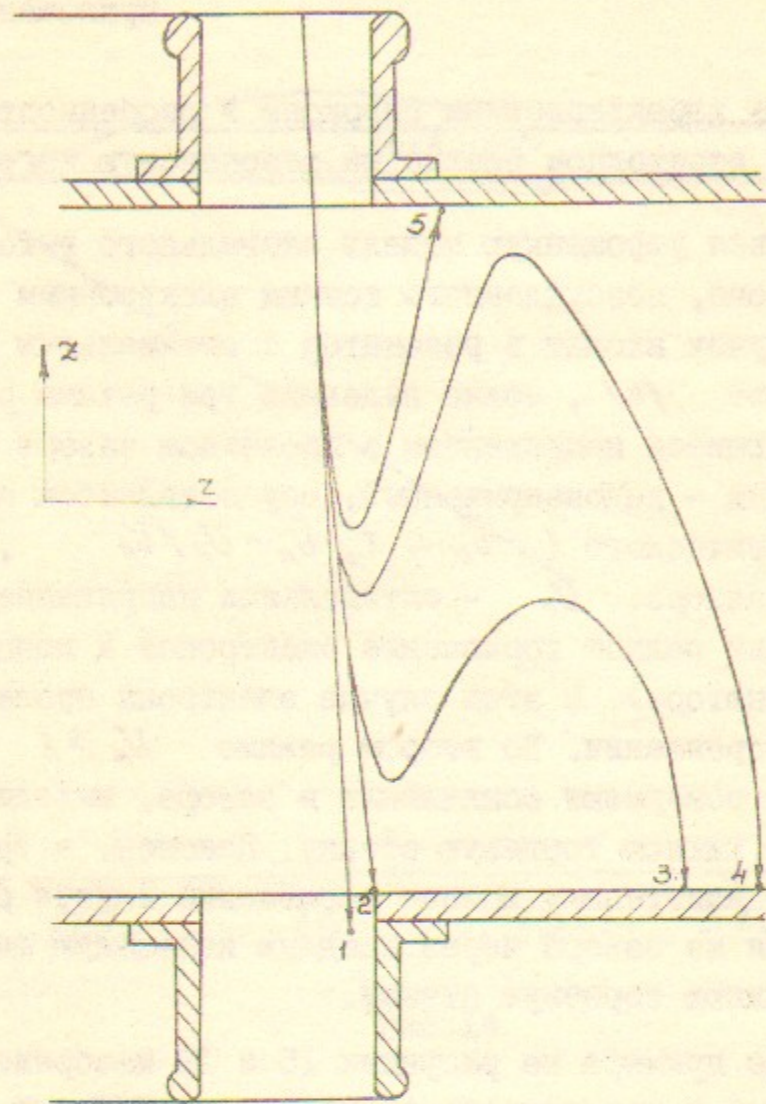


Рис.15. Траектории электронов в выходном резонаторе при различных напряжениях на пролетном зазоре.

- 1 - $U_H \leq 0,5$; 2 - $U_H = 1,0$; 3 - $U_H = 1,5$
 4 - $U_H = 1,7$; 5 - $U_H = 2,0$.

Формула (1) позволяет определить нагрузочные характеристики гирокон, т.е. зависимость высокочастотной мощности (P_{B2}) и возбуждающего выходной резонатор тока ($I_{Bозд}$) от сопротивления внешней нагрузки. Предполагая, что оба пространственноортогональных типа колебаний резонатора нагружены на одинаковые чисто активные сопротивления можно определить:

$$P_{B2} = \begin{cases} P_n R_{HE} & 0 \leq U_H \leq 1 \\ P_n \left[2 - \frac{\sqrt{8R_{HE} + R_{HE}^2} - R_{HE}}{2} \right] & 1 \leq U_H \leq 2 \end{cases} \quad (2)$$

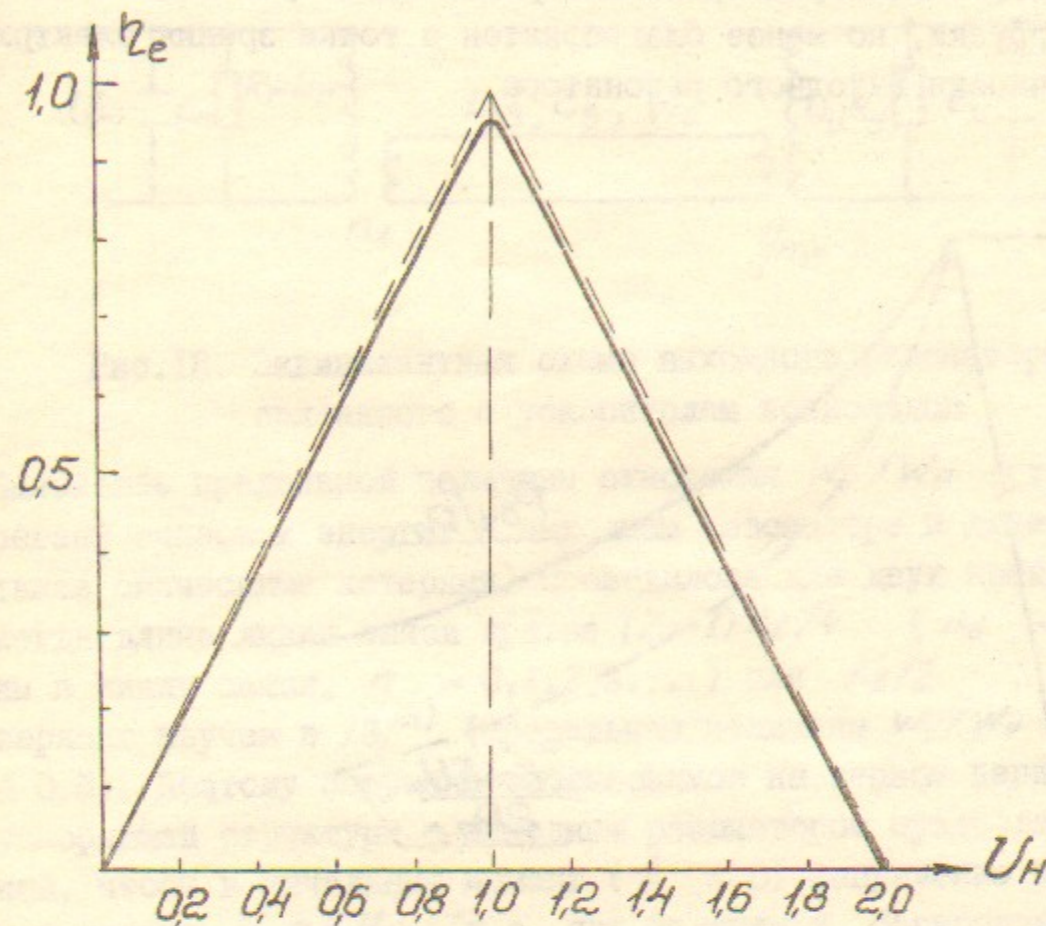


Рис.16. Зависимость электронного КПД (η_e) от напряжения на выходном резонаторе.

Сплошная линия - результаты численных расчетов, пунктир - аналитические оценки.

$$I_{Bозд} = 2 \frac{P_{B2}}{U_p} = \begin{cases} 2 \frac{P_n}{U_0} & 0 \leq U_H \leq 1 \\ 2 \frac{P_n}{U_0} \left[\frac{R_{HE} + 4 - \sqrt{8R_{HE} + R_{HE}^2}}{\sqrt{8R_{HE} + R_{HE}^2} - R_{HE}} \right] & 1 \leq U_H \leq 2 \end{cases} \quad (3)$$

$$U_H = \begin{cases} R_{HE} & 0 \leq U_H \leq 1 \\ \frac{1}{2} [\sqrt{8R_{HE} + R_{HE}^2} - R_{HE}] & 1 \leq U_H \leq 2 \end{cases} \quad (4)$$

Здесь: $R_{HE} = R_E / R_E^0$, R_E - суммарное сопротивление резонатора и нагрузки, пересчитанное к максимуму напряжения на резонаторе, R_E^0 - величина сопротивления при $\eta_e = 1$ и $U_H = 1$, $P_n = I_n U_H$ - мощность пучка.

Рисунок I7 иллюстрирует нагрузочные характеристики гирокона. Очевидно, слабоперенапряженный режим более устойчив к изменению нагрузки, но менее благоприятен с точки зрения электрической прочности выходного резонатора.

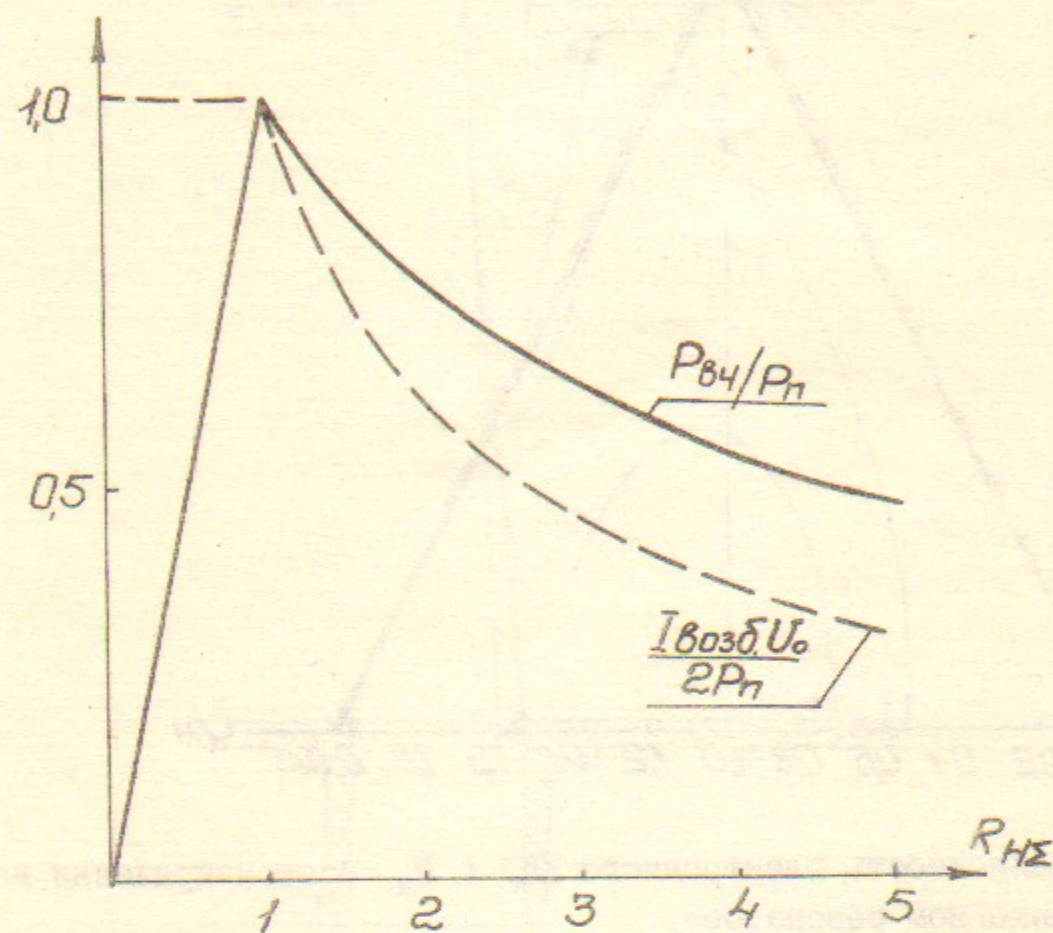


Рис. I7. Нагрузочные характеристики гирокона

При работе гирокона на ускоряющую структуру в режиме большой запасенной энергии важной характеристикой является отношение энергии, накопленной в структуре — $W_y = U_y^2 / 2P\omega$ (P — характеристическое сопротивление структуры), к энергии, отдаваемой источником — $W_u = P_i T$ (T — длительность импульса источника ВЧ мощности). Для выяснения величины этого отношения, рассмотрим эквивалентную схему, изображенную на рисунке I8, на которой выходной резонатор и ускоритель представлены параллельными контурами (L_p, C_p, R_p и L_y, C_y, R_y), а волновод в виде линии связи (L_B, C_B, W_B). Очевидно, энергетика переходного процесса в ускоряющей структуре при заданных нагрузочных характеристиках гирокона (2) и (3) будет определяться длиной линии связи.

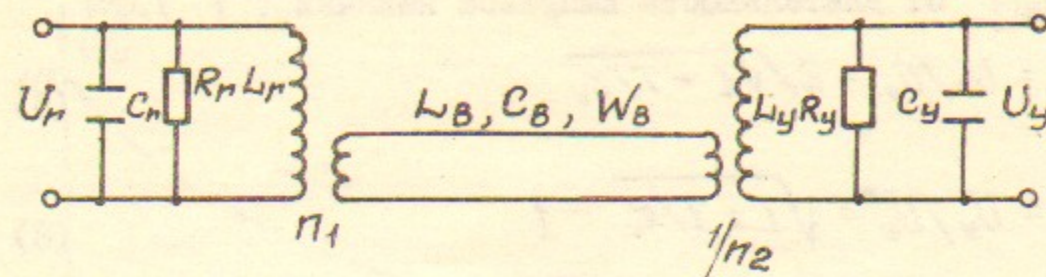


Рис. I8. Эквивалентная схема выходного резонатора, связанного с ускорителем волноводом

Выяснение предельной величины отношения W_y/W_u (т.е. пренебрегаем запасами энергии в выходном резонаторе и линии связи, а также омическими потерями) проводилось для двух крайних случаев, когда длина линии связи кратна $(2n+1)\lambda_B/4$ (λ_B — длина волны в линии связи, $n = 0, 1, 2, 3, \dots$) или $\lambda_B/2$. Последний вариант изучен в [3/*] (предельная величина W_y/W_u стремится к 0.5). Поэтому подробнее остановимся на первом варианте. Связь ускоряющей структуры с выходным резонатором предполагается такой, чтобы в начальный момент ($t = 0$) напряжение на выходном резонаторе $U_p = 2U_0$ (т.е. при включении, бесконечно быстро нарастает до этой величины), а к концу импульса тока пучка в гирокоме ($t = T$) U_p становилось равным U_0 , т.е., чтобы электронный КПД достигал максимальной величины. В этом случае энергетическое соотношение для гирокона, связанного с ЛУ принимает вид:

$$\frac{dW_y}{dt} = P_{e2}$$

Принимая во внимание формулы (2) и (4) для случая $1 \leq U_H \leq 2$ получим уравнение для напряжения на выходном резонаторе гирокона:

$$\frac{dU_p}{dt} = -\frac{1}{8U_0^2 \tau_c} U_p^3$$

Интегрирование этого уравнения позволяет определить зависимости

* Если длина линии связи кратна $\lambda_B/2$, а коэффициент связи достаточно велик, выходной и ускоряющий резонаторы можно представить в виде одного эквивалентного контура.

напряжений на выходном резонаторе, ускорителе, а также отношения W_y/W_u от длительности импульса накачки (T).

$$U_{нп} = U_r/U_0 = 2/\sqrt{1+T/\tau_c} \quad (5)$$

$$U_{нч} = U_y/U_y^m = \sqrt{1+T/\tau_c} - 1 \quad (6)$$

$$W_y/W_u = 4 \frac{1+0.5T/\tau_c - \sqrt{1+T/\tau_c}}{T/\tau_c} \quad (7)$$

Здесь: $\tau_c = c_y n_1^2 n_2^2 W_0^2 P_n / U_0^2$ — постоянная времени, определяемая параметрами пучка и линии связи; n_1, n_2 — коэффициенты трансформации; $U_y^m = 2 n_1 n_2 W_0 P_n / U_0$ — максимальное напряжение на ускоряющей структуре.

Графическое представление зависимостей (5), (6) и (7) приведено на рисунке 19. Видно, что отношение W_y/W_u достигает величины 0.666 (2/3) к концу времени накачки ($U_{нп} = 1$), если параметры пучка и линии связи удовлетворяют соотношению $\tau_c = T/3$.

Таким образом, в идеальном случае без учета запасов энергии в выходном резонаторе и волноводе вариант связи ускорителя с гироконом линией, длина которой кратна $(2n+1)\lambda_g/4$, энергетически более выгоден по сравнению со случаем кратности $\lambda_g/2$. Однако перенапряжения, возникающие в выходном резонаторе и окнах связи его с волноводом, в начальный момент времени могут привести к нарушению электрической прочности. Действительно, уже при $U_n = 1$ для электронов с энергией 1.6 МэВ, напряженность электрического поля в области прохождения пучка достигает 100–130 кВ/см, т.е. по имеющимся данным, близка к опасной.

Кроме того, оценки показывают, что при длине линии связи кратной $\lambda_g/2$, переход в перенапряженный режим позволяет увеличить предельное значение W_y/W_u до величины 0.6 (при $U_n = 1.4$) и, следовательно, свести разницу в энергетике между рассматриваемыми вариантами к минимуму.

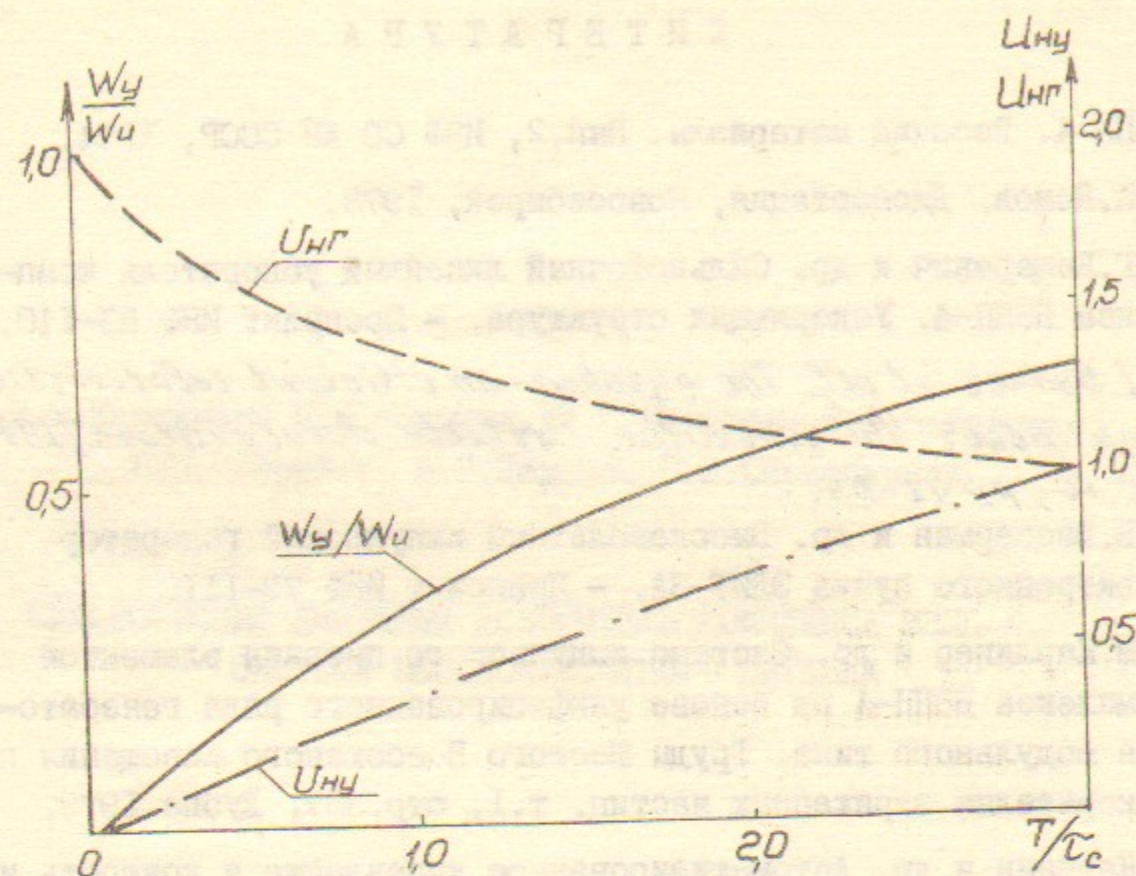


Рис.19. Зависимости предельного значения W_y/W_u , напряжения на выходном резонаторе ($U_{нп}$) и ускоряющего напряжения ($U_{нч}$) от длительности импульса источника электронов.

ЛИТЕРАТУРА

1. ВЭШ-4. Рабочие материалы. Вып.2, ИЯФ СО АН СССР, 1974.
2. Г.И.Яснв. Диссертация, Новосибирск, 1973.
3. В.Г.Вещеревич и др. Сильноточный линейный ускоритель комплекса ВЭШ-4. Ускоряющая структура. - Препринт ИЯФ 83-140.
4. *G.I. Budkez et al. The gyrokon - an efficient relativistic high-power VHF generator. Particle Accelerators, 1979, Vol. 10, pp 41-59.*
5. С.Б.Вассерман и др. Высоковольтный импульсный генератор электронного пучка ЭЛИТ-3А. - Препринт ИЯФ 79-III.
6. М.М.Карлинер и др. Система импульсного питания элементов комплекса ВЭШ-4 на основе унифицированного ряда генераторов модульного типа. Труды Шестого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. т.1, стр.337, Дубна 1979.
7. А.Калинин и др. Автоматизированное управление и контроль источника позитронов для накопителя ВЭШ-4. Труды Шестого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.1, стр.291, Дубна 1979.
8. И.Г.Макаров, Б.З.Персов. О переходном сопротивлении разъемных контактов с индиевой прокладкой на высоких частотах. - Препринт ИЯФ 79-15.
9. М.М.Карлинер и др. Круговая развертка пучка электронов в гироконе - Препринт ИЯФ 82-147.
10. *Budkez G. et al. Patent US № 3.885.193, May 1975*
11. М.М.Карлинер и др. Гирокон. Авторское свидетельство № 375000 Б.И., № 47, 1976 г.
12. И.Будрис, П.Шеневье. Цепи сверхвысоких частот, Москва, Советское радио, 1979.
13. *E. A. Knapp et al. Standing wave high energy accelerator structures. Rev. Sci. Instr., 1968, Vol. 39, No. 7, p. 979*

М.М.Карлинер, Е.В.Козырев, И.Г.Макаров, О.А.Нежевенко,
Г.Н.Острейко, Б.З.Персов, Г.В.Сердобинцев

СИЛЬНОТОЧНЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ КОМПЛЕКСА ВЭШ-4.
СИСТЕМА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПИТАНИЯ

Препринт
№ 84-110

Работа поступила 6 августа 1984г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов

Подписано к печати 15.08-1984 г. МН 04507

Формат бумаги 60x90 1/16 Усл. 2,0 печ.л., 1,6 учетно-изд.л.

Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ №110.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90