

451 307  
И Н С Т И Т У Т  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР

ПРЕПРИНТ И ЯФ 78-9

Г.И.Будкер, М.М.Карлинер, И.Г.Макаров,  
С.Н.Морозов, О.А.Нежевенко, Г.Н.Острейко,  
И.А.Шехтман

ГИРОКОН - МОЩНЫЙ СВЧ ГЕНЕРАТОР  
С ВЫСОКИМ КПД

Новосибирск

1978



Будкер Г.И., Карлинер М.М., Макаров И.Г.,  
Морозов С.Н., Неженко О.А., Острейко Г.Н.,  
Шехтман И.А.

ГИРОКОН - МОЩНЫЙ СВЧ ГЕНЕРАТОР С ВЫСОКИМ КПД

#### А Н Н О Т А Ц И Я

Описан предложенный Г.И.Будкером высокочастотный генератор-гирокон, принцип действия которого основан на модуляции отклонением мощного релятивистского пучка частиц с последующим полным торможением их в кольцевом резонаторе бегущей волны. Оценки достижимых параметров показывают, что при высоком КПД гирокон способен развить высокочастотную мощность, значительно превышающую мощность известных СВЧ приборов.

Даны различные конструктивные схемы гирокона. Приведены проектные характеристики гироконков, разработанных для питания ускорителей и накопителей электрон-позитронных встречных пучков, а также некоторые результаты испытаний.



Проблема получения большой мощности для высокочастотного питания новых ускорителей неизменно сохраняет свою актуальность. В качестве одного из её решений Г.И.Будкер в 1967 г. предложил СВЧ генератор с отклонением релятивистского пучка частиц - ги-рокон /Л-1/ж).

Устройство простейшего варианта ги-рокона схематически показано на рис.1. Непрерывный электронный луч-2 из высоковольтного ускорителя -1 отклоняется вращающимся магнитным полем резонатора развертки-3. Этот резонатор питается от возбуждателя-4, к которому подводится входной СВЧ сигнал. Отклоненные электроны движутся по прямой, образуя коническую поверхность, располагаясь на ней в виде винтовой линии, конец которой описывает окружность. Электростатическая система электродов -5 направляет электроны в кольцевую щель выходного резонатора-6. Последний настроен на частоту развертки так, что при резонансе в нем возникают колебания с максимальным электрическим полем в области кольцевой щели, сквозь которую проходит электронный луч. Этот луч, непрерывно меняя точку своего входа в резонатор, возбуждает в нем бегущую волну. Электрическое поле волны тормозит электроны, преобразуя мощность луча в СВЧ мощность, отбираемую через выводы энергии-7. Остаточная энергия электронов рассеивается в коллекторе -8.

Круговая развертка луча ги-рокона осуществляется магнитным полем цилиндрического резонатора с колебаниями типа  $E_{110}/L-2/$ , (рис.2). Два ввода мощности этого резонатора питаются со сдвигом фаз на  $90^\circ$ , что обеспечивает круговую поляризацию магнитного поля в приосевой области, где проходят отклоняемые электроны.

В выходном резонаторе-6 (рис.1) электроны возбуждают бегущее электромагнитное поле той же конфигурации, что и в резонаторе развертки, но они проходят в пучности электрического поля. Выходной резонатор является по существу свернутым в кольцо прямоугольным волноводом с волной типа  $H_{10}$ . Это резонатор настраивается на частоту развертки, но может быть настроен на частоту, кратную ей. В таком случае ги-рокон работает как умножитель частоты. Два вывода энергии-7, разнесенные по азимуту на  $90^\circ$  друг относительно друга подобно вводам мощности в резонаторе развертки (рис.2), при одинаковой их нагрузке и возбуждении ре-ж) от "gyros" (греч.) - круг и "continuous" (лат) - непрерывное; круговое отклонение непрерывного (несгруппированного) пучка.



зонатора электронным пучком обеспечивает в резонаторе - 6 режим бегущей волны. Этот режим может поддерживаться и при большем числе выводов энергии /Л-1/.

Электростатическая отклоняющая система - 5 представляет собой часть сферического конденсатора. Электромагнит - 9 создает в пролетном зазоре выходного резонатора поперечное статическое магнитное поле, которое компенсирует действие магнитного поля бегущей волны, снижающее эффективность торможения релятивистских электронов.

В связи с отсутствием в гироконе процесса модуляции электронного потока по плотности, гирокон свободен от принципиальных ограничений электронного кпд, свойственных мощным клистронам и СВЧ приборам с сеточным управлением. Действительно, поперечные размеры мощного пучка релятивистских электронов существенно меньше длины волны, бегущей в выходном резонаторе, поэтому все электроны луча тормозятся практически одинаково. Отсюда - возможность получения электронного кпд гирокона, близкого к 100%.

Процесс модуляции электронного потока по плотности отсутствует и в других типах СВЧ приборов с отклонением луча, один из которых, - прибор с кольцевым резонатором бегущей волны /Л-3, 4/, - является прототипом гирокона. Однако, отсутствие средств для получения релятивистского пучка электронов и их эффективного торможения, ограничивает возможности этого прибора диапазоном малых мощностей.

В гироконе, работающем при релятивистских энергиях электронов, сквозь отверстия и щели резонаторов можно провести с малым токооседанием электронный пучок большой мощности, т.к. в нем силы магнитного стягивания ослабляют действие поперечных сил объемного заряда в  $\gamma^2$  раз ( $\gamma$  - относительная энергия электронов). Это обеспечивает возможность достижения с помощью гирокона таких величин СВЧ мощности, которые недоступны для приборов /Л-3, 4, 5, 6, 7, 8/, работающих в принципе при нерелятивистских энергиях электронов.

В приборах с кольцевым резонатором бегущей волны при переходе к релятивистским энергиям действие магнитного поля вол-

ны может существенно изменить направление движения электронов на выходе из резонатора, возбуждаемого пучком. Электрон, направленный вдоль линий тормозящего поля приобретет заметную азимутальную скорость противоположную направлению движения волны, и часть энергии, связанная с этой скоростью, не сможет быть преобразована в энергию СВЧ колебаний. В связи с этим электронный кпд (П) прибора с кольцевым резонатором бегущей волны может стать заметно ниже 100% (I)\*).

$$\Pi = \frac{1 - \sqrt{1 - \beta_0^2 \left(1 - \frac{1}{\beta_0}\right)}}{\left(1 - \sqrt{1 - \beta_0^2}\right) \left(1 - \frac{1}{\beta_0}\right)} \quad (1)$$

Здесь  $\beta_0 = \frac{v_0}{c}$  - приведенная скорость электрона при влете в резонатор,  $\beta = \frac{v}{c}$ ,  $v$  - фазовая скорость бегущей волны,  $c$  - скорость света. Для  $\beta = 1,84$  (резонатор типа 6, рис.1) и  $\beta_0 \rightarrow 1$ ,  $\Pi = 65\%$ .

В гироконе действие магнитного поля волны компенсируется с помощью статического магнитного поля, которое либо создается в выходном резонаторе (компенсирующий магнит 9 на рис.1), либо через которое предварительно проходит электронный пучок. В последнем случае угол ( $\psi$ ), под которым электрон направляется в выходной резонатор гирокона, для получения кпд, близкого к 100%, составляет\*\*)

$$\psi = \arctg \frac{1 - \sqrt{1 - \beta_0^2}}{\sqrt{\beta_0^2 - \left(1 - \sqrt{1 - \beta_0^2}\right)^2}} \quad (2)$$

и для  $\beta = 1,84$ ,  $\beta_0 \rightarrow 1$  не превышает  $30^\circ$ .

По конструктивной схеме, показанной на рис.1, была построена первая действующая модель гирокона, на которой в 1971 году при энергии электронов 320 КэВ в импульсе длительностью 20 нсек была получена мощность в нагрузке более 600 кВт и экспериментально подтверждена возможность получения электронного кпд более 90% на частоте 430 МГц.

Для того, чтобы представить возможности гирокона, оценим его основные параметры, достижимые в принципе. При оценке допустим, что поперечные размеры луча в гироконе не превышают

\* См. Приложение I.



размеров свободного пучка релятивистских электронов, расходящихся под действием сил объемного заряда /Л-9/. Будем считать, что электронный пучок на выходе из ускорителя сфокусирован оптимальным образом /Л-10/ и имеет резко очерченные границы. Примем во внимание лишь азимутальный размер сечения пучка в выходном резонаторе, полагая, что второй поперечный размер может быть существенно уменьшен с помощью фокусировки после развертки. Предположим, далее, что угол отклонения электронного луча в резонаторе развертки мал ( $\leq 20^\circ$ ), а пролетный зазор этого резонатора выбран так, что потери в стенках приблизительно равны потерям на ускорение электронов развернутого луча при его максимальной мощности и минимуме мощности возбуждения. Допустим также, что пролетный зазор выходного резонатора выбран из условий минимума напряженности электрического поля при полном торможении электронов.

Анализ работы гирокон при этих предположениях приводит к следующим соотношениям для оценки основных параметров (см. приложения I, II, III):

$$P_{\max} = 4 \cdot 10^{-5} \left(\frac{D}{L}\right)^2 U_0^{\frac{5}{2}} \left(\frac{e}{mc^2} \cdot \frac{U_0}{2} + 1\right)^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

Выходная мощность

$$\eta_{эл} = \frac{\sin \frac{\delta\varphi}{2}}{\frac{\delta\varphi}{2}} \left(1 - \frac{\pi D}{\lambda} \sqrt{\frac{\gamma_0 + 1}{\gamma_0 - 1}} \cdot \operatorname{tg} \alpha\right) \quad (4)$$

Электронный КПД

$$K_{\max} = \frac{5 \cdot 10^{-6}}{\operatorname{tg}^2 \alpha} \sqrt{\left(\frac{\lambda}{\delta}\right) \frac{P_{\max}}{\gamma_0 (\gamma_0 + 1)}} \quad (5)$$

Коэффициент усиления

$$\lambda_{\min} = \frac{1,6 \cdot 10^6 \sqrt{\gamma_0^2 - 1}}{E_{\max}} \quad (6)$$

Минимальная длина волны

В этих соотношениях  $P_{\max}$  - предельная мощность луча гирокон, приблизительно равная его выходной СВЧ мощности,  $\eta_{эл}$  - отношение мощности, преобразуемой в СВЧ колебания, к мощности лу-

ча,  $K_{\max}$  - отношение мощности, преобразуемой в СВЧ колебания к мощности возбуждения резонатора развертки,  $\lambda, \lambda_{\min}$  - рабочая длина волны гирокон.

$D, L$  - начальный диаметр и длина луча,  
 $U_0$  - ускоряющее напряжение источника электронов,  
 $e, m$  - заряд и масса электрона,  
 $c$  - скорость света ( $\frac{mc^2}{e} = 5,11 \cdot 10^5 \text{В}$ ),  
 $\delta\varphi$  - азимутальный размер пучка в выходном резонаторе,

$\gamma_0 = \frac{eU_0}{mc^2} + 1$  - начальная относительная энергия электронов,  
 $\alpha$  - угол отклонения разворачиваемого луча,

$\delta$  - толщина скин-слоя материала стенок резонатора развертки,

$E_{\max}$  - допустимая напряженность электрического поля в выходном резонаторе.

Коэффициенты в приведенных соотношениях вычислены в системе единиц СИ.

Полагая возможным проведение через отверстия и щели резонаторов гирокон мощных электронных пучков с размерами  $D \approx \frac{\lambda}{20}$  и  $L \approx 2\lambda$ , получим из (3) значения предельно достижимой мощности гирокон (табл. I). Ограничения по длине волны ( $\lambda$ ) обсуждаются ниже.

Таблица I

Мощность гирокон ( $P_{\max}$ ) в зависимости от ускоряющего напряжения источника электронов

$U_0$ [кВ]	500	1000	1500	2000	3000
$P_{\max}$ [МВт]	8	70	270	720	3000

Для мощных высоковольтных ускорителей, работающих в непрерывном режиме, в настоящее время можно считать достижимыми параметры, указанные в первом столбце таблицы I; для режима микросекундных импульсов - параметры, указанные в третьем столбце. Это и является основным ограничением максимальной мощности



гирокона. В перспективе, повидимому, возможно достижение существенно большей мощности.

Для электронных пучков с параметрами, соответствующими таблице I, представляется возможным в метровом и дециметровом диапазоне волн получение азимутального размера  $\delta\varphi \leq 30^\circ$  при развертке на угол  $\alpha \geq 5,7^\circ$ . В этих условиях электронный КПД (4) составит  $\eta_{эл} \geq 96\%$ . Факторами, в принципе ограничивающими КПД гирокона являются:

1. Конечный поперечный размер пучка в выходном резонаторе и связанные с этим неодинаковые условия торможения электронов.

2. Разброс энергий электронов в пучке, вызванный круговой разверткой.

3. Неполное торможение электронов, необходимое для выхода пучка на коллектор. Оценка (4) учитывает лишь первые два фактора. Как показывает анализ, разброс энергий при развертке позволяет не учитывать действие третьего (см. приложение II).

Существует ряд факторов, снижающих электронный КПД, таких как начальный разброс энергий электронов, нестабильность тока луча, неточный подбор нагрузки выходного резонатора и т.п., действие которых может быть устранено путем рационального выбора параметров стабилизирующих систем и допусков на элементы конструкции гирокона. Исключение следует сделать для одного из факторов этого типа, влияние которого в гироконе устранить трудно, — для отличия волны в выходном резонаторе от бегущей. Оно характеризуется отношением максимального и минимального значений амплитуды напряжения на пролетном зазоре выходного резонатора при обходе вдоль кольцевой щели. Полагая возможным поддерживать это отношение на уровне 1,03, мы допускаем снижение КПД гирокона еще на полтора процента.

Полный КПД гирокона, определяемый как отношение выходной СВЧ мощности к мощности электронного пучка, ниже электронного КПД за счет потерь тока луча, достижимый уровень которых примем — 1%, и за счет потерь в стенках выходного резонатора (2%), т.е. составит 92%.

Промышленный КПД генератора, определяемый как отношение выходной СВЧ мощности к мощности, потребляемой установкой от

сети, дополнительно снизится за счет потерь в цепях электронного, вакуумного и другого оборудования гирокона (3%). Еще 5% могут составить потери в системе стабилизации энергии высоковольтного ускорителя электронов. Эти оценки сделаны для максимальной мощности гирокона непрерывного генерирования метрового диапазона волн (табл. I,  $U_0 = 500$  кВ). При повышении ускоряющего напряжения (табл. I,  $U_0 \geq 1000$  кВ) потерями в выходном резонаторе и в цепях вспомогательного оборудования гирокона при оценке КПД можно пренебречь.

Таким образом, предельные оценки электронного КПД 90+95% и промышленного КПД 85+90% дают представление об энергетических возможностях гирокона.

Оценка коэффициента усиления (5), сделанная для гирокон с параметрами, указанными в таблице I, приводит к значениям  $K_{max} = 100 + 3000$  (20+35 дБ), если  $tg\alpha = 0,1$  (см. приложение II). Однако, достижение такого малого угла развертки ( $\alpha$ ) в простейшей конструктивной схеме (рис. I) возможно лишь за счет удлинения луча, т.е. снижения максимальной мощности. Повысить коэффициент усиления без снижения мощности можно путем дополнительного отклонения луча статическим полем, не требующим затрат мощности ВЧ. Вариант конструктивной схемы гирокона, где осуществляется этот способ при минимальной длине луча, показан на рис. 3. Это — радиальный гирокон /Л-II/. В нем дополнительная отклоняющая система — 5 переводит слабо развернутый луч в плоскость, перпендикулярную оси гирокона. Выходной резонатор — 6 в этом варианте представляет собой прямоугольный волновод с бегущей  $H_{10}$  волной, свернутый в кольцо в плоскости  $E$ , а не в плоскости  $H$ , как на рис. I. Система — 5 (рис. 3), отклоняющая релятивистский пучок почти на  $90^\circ$ , выполняется магнитоэлектрической (например, в виде конической катушки), т.к. электростатическая система не обладает необходимой электрической прочностью.

При движении в радиальном магнитном поле вблизи вершины конической катушки — 5 (рис. 3) электрон описывает траекторию двойной кривизны: он не только переходит в плоскость, перпендикулярную оси гирокона, но и приобретает азимутальную составляющую скорости, необходимую для влета в выходной резонатор



под заданным углом  $\psi$  (2). Максимальная магнитная индукция в отклоняющей системе не превышает единиц Тесла (для гирокона дециметрового диапазона при  $\operatorname{tg} \alpha = 0,1$  и  $U_0 = 3000$  кВ). Азимутальная дефокусировка пучка подобной системой не выводит его размер за пределы  $\delta\varphi = 30^\circ$  (см. приложение IV).

Таким образом, коэффициент усиления  $20+35$  дБ может быть получен в радиальном гироконе при длине луча  $L \cong 2\lambda$ , т.е. без снижения максимальной мощности, указанной в табл. I, и электронного КПД, приведенного выше.

Дальнейшее повышение коэффициента усиления может быть достигнуто путем применения развертывающего устройства с пассивным резонатором (рис. 4) /Л-12/. В нем после резонатора развертки - 3 располагается пассивный резонатор - 5, тождественный резонатору - 3, но не имеющий вводов мощности. Электронный луч, развернутый полем резонатора - 3 на малый угол, возбуждает в резонаторе - 5 бегущую волну, магнитное поле которой дополнительно отклоняет электроны. Часть мощности луча теряется при этом на ВЧ нагрев стенок пассивного резонатора. Анализ работы такой схемы указывает в принципе на возможность увеличить коэффициент усиления гирокон еще в 100 раз (см. приложение II), хотя это и связано с некоторым снижением мощности.

Оценка минимальной рабочей волны гирокон (6) (см. приложение III) учитывает ограничение, которое наступает вследствие недостаточной электрической прочности пролетного зазора выходного резонатора. Для непрерывного режима работы резонаторов допускают  $E_{max} \leq 10 \frac{\text{МВ}}{\text{М}}$ , а в режиме импульсов микросекундной длительности  $E_{max} \leq 50 \frac{\text{МВ}}{\text{М}}$ . Для этих условий и уровней мощности, указанных в таблице I,  $0,3 \text{ м} \leq \lambda_{min} \leq 1,1 \text{ м}$  для непрерывного режима и  $0,06 \text{ м} \leq \lambda_{min} \leq 0,22 \text{ м}$  для импульсного. Однако на волнах короче  $0,1 \text{ м}$  могут оказаться невыполнимыми исходные предположения о достижимости малых диаметров луча ( $D \cong \frac{\lambda}{20}$ ) при его мощности в десятки и сотни мегаватт и токооседания на стенки, не превышающего 1%. Это может наложить существенные ограничения на КПД и мощность гирокон.

В рассмотренном диапазоне частот ( $10^8+10^9$  Гц) добротность резонатора развертки имеет порядок  $10^4$ . Связанная с этим узкая

полоса частот ограничит, повидимому, применение гирокон в системах передачи информации. Расширение полосы связано с соответствующим снижением коэффициента усиления.

х х

х

Приведенные оценки основных параметров показывают, что в диапазоне метровых и дециметровых волн гирокон в принципе способен развить высокочастотную мощность, значительно превышающую мощности клистронов /Л-7/ и ламп с сеточным управлением /Л-8/ при коэффициенте усиления более 40 дБ и необычно высоком для СВЧ приборов электронном КПД  $90+95\%$ .

Реализация этих параметров связана с решением ряда сложных технических задач, часть из которых возникает при разработке сверхмощных СВЧ приборов любых типов, а часть - только при разработке гирокон. К последней группе задач относится создание такого электронно-оптического тракта гирокон, чтобы токооседание на стенки не превышало 1% в условиях, когда постоянное магнитное сопровождение электронного потока исключено. С этой задачей связано создание ВЧ системы, поддерживающей высокую точность круговой поляризации магнитного поля в резонаторе развертки, а также системы стабилизации энергии электронов, поступающих из высоковольтного ускорителя. Для работы с высоким КПД нужна система точного поддержания режима бегущей волны в выходном резонаторе.

Этот перечень задач показывает, что сооружение сложного устройства, каким представляется гирокон, оправдано лишь для таких значений основных параметров, которые недостижимы с помощью более простых источников СВЧ мощности.

В литературе неоднократно описывались электронно-лучевые приборы СВЧ, близкие по схеме к гирокону, но не обладавшие его возможностями /Л-3,4,5,6/. Новыми элементами необходимыми для получения мощности, КПД и усиления, отличающимися гирокон от этих приборов, являются:

- а) источник релятивистских электронов,
- б) компенсирующий магнит или магнитная система для на -



правления электронов в выходной резонатор под заданным углом, создающие возможность полного торможения релятивистских электронов,

в) магнитостатическая отклоняющая система, позволяющая работать с малым углом развертки при минимальной длине луча, что необходимо для получения большого усиления при высокой мощности.

В Институте ядерной физики (г.Новосибирск) по инициативе Г.И.Будкера построены два гирокон со следующими проектными характеристиками.

1. Гирокон непрерывного генерирования для ВЧ питания резонаторов электрон-позитронного накопителя ВЭП-4.

Выходная мощность  $P_{max} = 5000$  кВт  
Ускоряющее напряжение  $U_0 = 500$  кВ  
Рабочая длина волны  $\lambda = 1,65$  м (181МГц)  
Коэффициент усиления  $K_{max} = 23$  дБ  
Полный КПД  $\eta = 80\%$

2. Импульсный гирокон для ВЧ питания линейного ускорителя источника позитронов ВЭП-4.

Импульсная мощность  $P_{max} = 200$  МВт  
Ускоряющее напряжение  $U_0 = 2000$  кВ  
Длительность импульса  $\tau = 10$  мксек  
Частота повторения  $F = 1$  Гц  
Рабочая длина волны  $\lambda = 0,7$  м (430 МГц)  
Коэффициент усиления  $K_{max} = 25$  дБ

На этих установках проведены первые циклы стендовых испытаний.

В гироконе непрерывного генерирования /Л-13,20/ (рис.5) получен электронный пучок мощностью более 1000 кВт, развернутый (с частотой 181 МГц) и пропущенный через расстроенный выходной резонатор. Энергия электронов в этом эксперименте - 220 КэВ. Электронный пучок мощностью 700 кВт (с энергией электронов 210 КэВ) возбуждал выходной резонатор гирокон, преобразуя в ВЧ мощность 500 кВт в непрерывном режиме. Целью проведенных испытаний являлась отработка электронно-оптического тракта гирокон. Токооседание при этих экспериментах не превышало 1%.

Импульсный гирокон /Л-14,21/ (рис.6) на частоте 430 МГц развивал мощность 40 МВт в импульсе, длительность которого между точками половинной мощности составляла  $\tau = 6$  мксек при частоте повторения  $F = 0,5$  Гц (энергия электронов 1300 КэВ). Достигнутый коэффициент усиления - 23 дБ. Целью проведенных испытаний являлась отработка схемы получения позитронов с помощью линейного ускорителя, питаемого гироконом.

Вместе с результатами, полученными ранее при испытании импульсной модели гирокон /Л-15/, где был измерен электронный КПД выше 90%, приведенные экспериментальные данные подтверждают правильность наших представлений о возможностях гирокон. Они показывают, что новый источник СВЧ колебаний сможет найти применение в ускорительной технике и СВЧ энергетике, особенно в тех её областях, где требуется высокая мощность в единице оборудования при минимальных потерях.



ПРИЛОЖЕНИЕ I

Особенности движения релятивистского электрона  
в поле электромагнитной волны, бегущей в цилиндрическом резонаторе с колебаниями типа  $E_{H10}$ .  
Оценка предельного КПД при возбуждении резонатора  
электронным пучком.

I. Для электромагнитного поля в цилиндрическом резонаторе с колебаниями типа  $E_{H10}$ , образующими бегущую волну (см. рис. 2), между составляющими поля  $E_z$  и  $B_r$  в произвольной точке выполняется соотношение (I.1):

$$\frac{E_z}{B_r} = \omega r \quad (I.1)$$

где  $E_z$  - напряженность электрического поля,  
 $B_r$  - радиальная составляющая магнитной индукции,  
 $\omega$  - круговая частота колебаний,  
 $r$  - радиальная координата точки.

Положение резонатора в цилиндрической системе координат ( $r, \varphi, z$ ) и его размеры ( $a, b$ ), показаны на рисунке I.1. Одно из уравнений движения электрона в поле этого резонатора,

$$\frac{d}{dt}(r\dot{\varphi}) + r\ddot{\varphi} + 2\dot{r}\dot{\varphi} = -\frac{eB_r}{\gamma m} \dot{z} \quad (I.2)$$

совместно с уравнением энергии,

$$\dot{\gamma} = -\frac{e}{mc^2} E_z \dot{z}, \quad (I.3)$$

где точка означает дифференцирование по времени, интегрируется, если электромагнитное поле является полем бегущей волны, т.е. при выполнении условия (I.1).

Интеграл движения имеет вид (I.4):

$$\gamma \left( \frac{\omega r^2}{c^2} \dot{\varphi} - 1 \right) = \gamma_0 \left( \frac{\omega r_0^2}{c^2} \dot{\varphi}_0 - 1 \right). \quad (I.4)$$

Здесь  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$  - относительная энергия электрона (релятивистский фактор),  
 $e, m$  - заряд (абсолютная величина) и масса электрона,

$\beta = \frac{|v|}{c}$ ,  $|v|$  - скорость электрона,  $c$  - скорость света в вакууме,

$r_0, \dot{\varphi}_0, \gamma_0$  - определяются по начальным значениям координат и скорости электрона при влете его в резонатор.

2. Рассматриваемый резонатор с бегущей волной является по существу предельным случаем свернутого в кольцо прямоугольного волновода (размером сечения  $a \times b$  рис. I.1) с бегущей в нем волной типа  $H_{10}$ . Другим предельным случаем кольцевого резонатора является "развернутое кольцо" - бесконечный прямоугольный волновод. Электроны, возбуждающие резонатор (см. 6 на рис. I), проходят в щели, прорезанные вдоль узловых линий радиального тока. Эти линии - окружности радиуса  $r_m$  (см. рис. I.1). Для рассматриваемого резонатора с колебаниями типа  $E_{H10}$

$$r_m = \frac{t_{11}}{2\pi} \lambda = 0,29\lambda$$

где  $t_{11} = 3,84$  - первый корень уравнения  $J_1(t) = 0$ ,  
 $J_1(t)$  - функция Бесселя I-го рода I-го порядка,  
 $\lambda$  - резонансная длина волны ( $\lambda_{E_{H10}} = 1,64a$ )

Так как слабо излучающие щели не должны быть широкими (их ширина  $D = 0,05\lambda \ll r_m$ ), электрон, проходящий в обе щели, летит по траектории, для которой  $r \cong r_m$ .

Будем полагать, что это условие выполняется для электронов, возбуждающих рассматриваемый резонатор, хотя его точное выполнение ( $r = r_m$ ) возможно лишь для "развернутого кольца", т.е. для электронов, движущихся в  $E$ -плоскости симметрии бесконечного прямоугольного волновода с  $H_{10}$  волной.

Интеграл движения (I.4) в приближении "развернутого кольца" примет вид (I.5):

$$\gamma(\sqrt{\beta}\dot{\varphi} - 1) = \gamma_0(\sqrt{\beta_0}\dot{\varphi}_0 - 1) \quad (I.5)$$



где  $\nu = \frac{V}{c}$ ;  $\beta_{\varphi} = \frac{V_{\varphi}}{c}$ ;  $\beta_{\varphi_0} = \frac{V_{\varphi_0}}{c}$

$V = \omega z_m$  - фазовая скорость бегущей волны,

$V_{\varphi} = \dot{\varphi} z_m$  - составляющая скорости электрона в направлении бегущей волны,

$V_{\varphi_0} = \dot{\varphi}_0 z_m$  - та же составляющая в момент входа электрона в резонатор,

$c$  - скорость света в вакууме,

$\gamma, \gamma_0$  - релятивистский фактор текущий и начальный.

3. Предельный электронный КПД - ( $\Pi$ ) вычисляется по формуле (I.6):

$$\Pi = \frac{\gamma_0 - \gamma_{\varphi}}{\gamma_0 - 1} \quad (I.6)$$

Здесь  $\gamma_0 = \frac{1}{\sqrt{1-\beta_0^2}}$ ,  $\gamma_{\varphi} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta_{\varphi}^2}}$  - значения релятивистского фактора в начале и в конце торможения электрона.

Предполагается, что в начале скорость электрона аксиальна ( $\beta_0 = \frac{V_{z0}}{c}$ ), а в конце, - на вершине траектории, - в точке, где траектория, искривленная действием радиальной составляющей, магнитного поля бегущей волны, касается торцевой стенки резонатора (кривая I на рис. I.1), скорость - азимутальна ( $\beta_{\varphi} = \frac{V_{\varphi\varphi}}{c}$ ). При этом соотношение (I.5) для вершины траектории упрощается:

$$\gamma_{\varphi}(\nu\beta_{\varphi} - 1) = -\gamma_0 \quad (I.7)$$

Исключая  $\gamma_{\varphi}$  из (I.6) и (I.7), получим формулу (I.8) для оценки предельного электронного КПД при взаимодействии электронного пучка с полем кольцевого резонатора бегущей волны:

$$\Pi = \frac{1 - \sqrt{1 - \beta_0^2} \left(1 - \frac{1}{\nu}\right)}{(1 - \sqrt{1 - \beta_0^2}) \left(1 - \frac{1}{\nu}\right)} \quad (I.8)$$

Обозначения см. в (I).

Для рассматриваемого резонатора  $\nu = \frac{V}{c} = t'_{11} = 1,84$ , где  $t'_{11}$  - первый корень уравнения  $J_1'(t) = 0$ ,  $J_1'(t)$  - производная функции Бесселя. Для кольцевого резонатора с

$\nu = 1,84$ , электронный КПД ( $\Pi$ ) снижался бы следующим образом (см. табл. 2) в зависимости от ускоряющего напряжения

Таблица 2

$U_0$ [кВ]	500	1000	1500	2000	3000
$\Pi$ %	89	83	79	77	74

4. Угол  $\psi$ , под которым электрон направляется в выходной резонатор гирокон, чтобы предотвратить снижение КПД, по определению равен (I.9):

$$\psi = \arctg \frac{V_{\varphi_0}}{V_{z0}} = \arctg \frac{\beta_{\varphi_0}}{\beta_{z0}} \quad (I.9)$$

(см. кривую 2 на рис. I.1).

Для того чтобы КПД составлял 100%, на вершине траектории должно выполняться условие  $\beta_{\varphi\varphi} = 0$ ,  $\gamma_{\varphi} = 1$ . Соотношение (I.5) в этом случае примет вид (I.10):

$$-1 = \gamma_0(\nu\beta_{\varphi_0} - 1) \quad (I.10)$$

Учитывая, далее что  $\beta_{z0} = \sqrt{\beta_0^2 - \beta_{\varphi_0}^2}$ , получим из (I.9) и (I.10):

$$\psi = \arctg \frac{1 - \sqrt{1 - \beta_0^2}}{\sqrt{\nu^2 \beta_0^2 - (1 - \sqrt{1 - \beta_0^2})^2}} \quad (I.11)$$

Обозначения см. в (I). Из (I.10) следует, что направление азимутальной составляющей начальной скорости электрона должно совпадать с направлением бегущей волны.

Для выходного резонатора с  $\nu = 1,84$  угол  $\psi$  имеет следующую величину (табл. 3):

Таблица 3

$U_0$ [кВ]	500	1000	1500	2000	3000
$\psi$	18°	22,5°	25°	26°	28°



5. Погрешность оценок, сделанных по формуле (I.8), определяется неточностью приближения "развернутого кольца" ( $z \approx z_m$ ). Расчет радиальной координаты вершины траектории, сделанный в этом приближении /Л-16/, показывает, что для рассматриваемого резонатора наибольшее отклонение ( $\Delta z$ ) траектории от поверхности  $z = z_m$  составляет  $\frac{\Delta z}{z_m} \approx 18\%$ . При этом уменьшение тормозящего поля резонатора составит  $\approx 5\%$ , что и определяет, в основном, погрешность оценок (I,8).

6. Отклонение траектории электрона от поверхности  $z = z_m$ , может привести к дополнительному снижению электронного КПД за счет действия азимутальной составляющей магнитной индукции  $B_\varphi$ .

При  $\Delta z = z - z_m \neq 0$  и  $\frac{\Delta z}{z_m} \ll 1$  эта составляющая в рассматриваемом резонаторе может быть оценена по соотношению (I.12):

$$\frac{B_\varphi}{E_z} \approx \frac{1}{cV} (V^2 - 1) \frac{\Delta z}{z_m} \cdot \text{tg}(\omega t - \varphi) \quad (I.12)$$

где  $E_z$  - напряженность электрического поля,

$$V = \frac{V}{c} = \frac{2\pi z_m}{\lambda} = \frac{\omega z_m}{c}$$

$V$  - фазовая скорость бегущей волны

$c$  - скорость света в вакууме

$\omega$  - круговая частота колебаний

$\omega t, \varphi$  - текущая фаза и азимутальная координата электрона.

Действие азимутальной составляющей магнитной индукции в процессе движения электрона усредняется, в отличие от действия радиальной составляющей ( $B_z$ ), которая в соответствии с (I,1) при

$z = z_m$  - постоянна:  $\frac{B_z}{E_z} = \frac{1}{\omega z_m} = \frac{1}{cV}$ . Предположим, что и азимутальная составляющая  $B_\varphi$  также постоянна и равна максимальному значению, которое она может принять на траектории электрона:

$$\left| \frac{B_\varphi}{E_z} \right| = \frac{1}{cV_1} \quad (I.13)$$

$$\text{где } V_1 = \frac{V}{\left( \frac{\Delta z}{z_m} \right)_{\max} (V^2 - 1) |\text{tg}(\omega t - \varphi)|_{\max}} > V$$

Обозначения те же, что в (I.12).

При таком предположении в приближении "развернутого кольца" может быть получен еще один интеграл движения, аналогичный выражению (I.5), но для радиальной составляющей скорости электрона. Полагая далее, что электрон влетает в резонатор под углом  $\psi$  (I.9, I,II), получим выражение для дополнительного снижения КПД (I- $\Pi_1$ ), в котором  $\Pi_1$  вычисляется по формуле (I.8) с заменой параметра  $V$  на  $V_1$  (I.13). Наибольшее снижение КПД будет в случае ультрарелятивистских электронов ( $\beta_0 \rightarrow 1$ ) и составит при  $V_1 \gg 1$

$$1 - \Pi_1 \approx \frac{1}{V_1} \quad (I.14)$$

Оно может быть устранено путем радиальной фокусировки электронов (т.е. направления их в резонатор под углами  $\pm \psi_1$  к поверхности  $z = z_m$ ). Угол  $\psi_1$  вычисляется по формуле (I.11) с заменой  $V$  на  $V_1$ , и при  $\beta_0 \rightarrow 1$  и  $V_1 \gg 1$  составит

$$\psi_1 \approx \frac{1}{V_1} \quad (I.15)$$

Для граничного электрона пучка диаметром  $D = 0,05 \lambda$ ,  $\Delta z_{\max} = \frac{D}{2}$ , при условии, что траектория электрона в резонаторе лежит в области значений  $|\text{tg}(\omega t - \varphi)|_{\max} \leq 1$ , а также при  $z_m = 0,29 \lambda$  и  $V = 1,84$  получим из (I.13)  $V_1 \approx 5V = 9,2$ , что соответствует потере КПД I- $\Pi_1 \approx 11\%$ .

Необходимый для устранения этой потери угол  $\psi_1 \approx 6^\circ$ .

7. В случае конечного азимутального размера пучка ( $\delta\varphi$ ) условия радиальной фокусировки неодинаковы для различных электронов. Значение параметра  $V_1$ , характеризующего нескомпенсированное действие магнитного поля на крайние (по азимуту) электроны может быть оценено аналогично (I.13):

$$V_1 = \frac{V}{\left( \frac{\Delta z}{z_m} \right)_{\max} (V^2 - 1) \cdot \text{tg} \frac{\delta\varphi}{2}} \quad (I.16)$$

Для  $\delta\varphi = 30^\circ$  и указанных выше условий снижение КПД (см. I.16) составит  $\approx 3\%$ , а в среднем  $\approx 1,5\%$ .

8. Конечный азимутальный размер пучка ( $\delta\varphi$ ) приводит к снижению электронного КПД гироконуса вследствие различия в условиях. Это снижение КПД в формуле (4) не учитывается, т.к. предполагается возможным получение малого ( $\Delta z_{\max} \rightarrow 0$ ) радиального размера пучка за счет фокусировки.



виях торможения электронов. Если полагать распределение числа электронов в пучке по азимуту равномерным и тормозящее напряжение резонатора равным  $U \cos \varphi$ , где  $\varphi$  — азимутальная координата (начало отсчета в центре пучка), то энергия, уносимая электроном на коллектор составит  $e(U_0 - U \cos \varphi)$  ( $eU_0$  — начальная энергия электрона). Суммарная потерянная энергия при этом пропорциональна

$$e(U_0 \delta\varphi - U \int_{-\frac{\delta\varphi}{2}}^{\frac{\delta\varphi}{2}} \cos \varphi d\varphi).$$

Полное торможение центрального электрона наступит при условии  $U = U_0$ . В этом случае электронный КПД составит (I.17):

$$\eta_{эл} = 1 - \frac{\delta\varphi - 2 \sin \frac{\delta\varphi}{2}}{\delta\varphi} = \frac{\sin \frac{\delta\varphi}{2}}{\frac{\delta\varphi}{2}} \quad (I.17)$$

## П Р И Л О Ж Е Н И Е П

Оценка мощности, необходимой для отклонения пучка релятивистских электронов вращающимся магнитным полем цилиндрического резонатора с колебаниями типа  $E_{II0}$ . Оценка предельного коэффициента усиления гирокона и энергетического разброса при развертке пучка

I. В приосевой области резонатора с бегущей волной, образованной двумя колебаниями типа  $E_{II0}$  (рис.2) магнитное поле имеет круговую поляризацию. Электрон, вошедший в такое поле по оси резонатора, выйдет из него в стороне от оси и изменит свою энергию. Соотношение между энергией, радиальной координатой и азимутальной скоростью ( $\dot{\varphi}$ ) (I.4)<sup>\*</sup> для электрона, влетающего в резонатор с  $\dot{\varphi}_0 = 0$ , имеет вид (II.1):

$$\frac{\dot{\varphi}_0}{\dot{\varphi}} = 1 - \frac{\omega r^2}{c^2} \dot{\varphi} = 1 - \frac{\omega}{c^2} (x\dot{y} - y\dot{x}) \quad (II.1)$$

Здесь обозначения те же, что в (I.4), а  $x, y, \dot{x}, \dot{y}$  — текущие координаты и скорости в декартовой системе ( $x, y, z$ ), изображенной на рис. I.1. В этой системе координат уравнения движения электрона в рассматриваемом поле дважды интегрируются, если предполагать, что продольная скорость электрона не изменяется ( $\dot{z} = \dot{z}_0$ ) /I-17/. По найденным из этих приближенных уравнений координатам и скоростям электрона на выходе из резонатора оценивается изменение энергии ( $\frac{\dot{\varphi}_0}{\dot{\varphi}}$ ) (II.1) и угол отклонения при развертке ( $\alpha$ ). По определению этот угол (рис. I.1, кривая 3), вычисляется из (II.2):

$$\tan \alpha = \frac{dr}{dz} = \frac{\dot{r}}{\dot{z}} \quad (II.2)$$

где  $\dot{r} = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 - (r\dot{\varphi})^2}$

В нулевом приближении (когда, кроме  $\dot{z} = \dot{z}_0$ , еще и  $(r\dot{\varphi})^2 \ll \dot{z}^2$ ) из  $\dot{x}, \dot{y}$  и (II.2) следует формула (II.3):

$$\tan \alpha \approx \frac{1}{2\dot{z}_0(t'_{21})} \sqrt{\frac{\dot{\varphi}_0 - 1}{\dot{\varphi}_0 + 1}} \cdot \frac{U_m}{U_0} \frac{\sin \alpha}{\alpha} \quad (II.3)$$

<sup>\*</sup> См. Приложение I.



Здесь  $J_1(t'_{11})$  - значение функции Бесселя I-го порядка в первом максимуме  
 $U_m$  - амплитуда в.ч. напряжения в пучности электрического поля резонатора,  
 $U_0$  - ускоряющее напряжение развертываемого пучка,  
 $\gamma_0 = \frac{1}{\sqrt{1-\beta_0^2}}$  - релятивистский фактор,  
 $\alpha = \frac{\pi \epsilon}{\beta_0 \lambda}$  - половина невозмущенного угла пролета,  
 $\epsilon$  - пролетный зазор резонатора,  
 $\lambda = 1,64 a$  - резонансная длина волны (рис. I, I).

Погрешность этой формулы по оценкам, сделанным с помощью соотношения (П.1) /Л-17/ не выходит за пределы  $\pm 10\%$  при  $\alpha \leq 20^\circ$  и  $\alpha \leq 0,6$  (невозмущенный угол пролета  $\leq 70^\circ$ ).

2. ВЧ мощность, необходимая для создания поля, отклоняющего электрон на угол  $\alpha$  при круговой развертке, определится по напряжению на резонаторе ( $U_m$ ) и его шунтовому сопротивлению ( $R_{ш}$ ):

$$P_1 = \frac{U_m^2}{2R_{ш}} \quad (\text{П.4})$$

$$\text{Здесь } R_{ш} = \frac{\epsilon}{\delta} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cdot \frac{0,175}{1 + \frac{a}{\delta}}$$

$a, \epsilon$  - размеры резонатора (рис. I, I)  $\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \text{ Ом}$ ,  
 $\delta$  - толщина скин-слоя материала стенок резонатора.

Подставляя в (П.4) напряжение  $U_m$ , вычисленное из (П.3) получим мощность потерь в стенках резонатора развертки (П.5):

$$P_1 \approx \frac{U_0^2}{\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}} \cdot 12,3 \left(\frac{\delta}{\lambda}\right) \frac{\gamma_0^2}{(\gamma_0 - 1)^2} \cdot \frac{\beta_0 \alpha + 1,9}{\sin^2 \alpha} \cdot \gamma^2 \alpha \quad (\text{П.5})$$

Обозначения те же, что в (П.3) и (П.4).

3. Изменение энергии  $\frac{h}{\lambda_0}$  электрона, прошедшего через рассматриваемый резонатор, найденное из (П.1), позволяет рассчитать мощность ( $P_n$ ) взаимодействия пучка с полем резонатора (П.6):

$$P_n = P_0 \frac{\gamma_0}{\gamma_0 - 1} \left(\frac{\gamma}{\gamma_0} - 1\right) \quad (\text{П.6})$$

Здесь  $\gamma_0, \gamma$  - релятивистский фактор электрона на входе и выходе резонатора.  
 $P_0$  - мощность пучка.

Из (П.1), (П.6) с учетом (П.2) получим выражение для оценки мощности ( $P_2$ ), расходуемой на ускорение электронов при развертке релятивистского пучка на угол  $\alpha$  (П.7):

$$P_2 = P_n \approx P_0 \left(1 + \frac{1}{\gamma_0}\right) (1 - \alpha \operatorname{ctg} \alpha) \cdot \gamma^2 \alpha \quad (\text{П.7})$$

Здесь обозначения те же, что в (П.3) и (П.6).

4. По определению коэффициент усиления гирокон равен (П.8):

$$K_p = \frac{P_{вч}}{P_1 + P_2} \quad (\text{П.8})$$

где  $P_{вч} = P_0 \eta_{эл}$ ,  $P_0$  - мощность пучка,  $\eta_{эл}$  - электронный КПД,  $P_1 + P_2 = P_{сх}$  - мощность возбуждения гирокон. Минимум  $P_{сх}$  в зависимости от угла пролета ( $2\alpha$ ) наступает при условии (П.9)

$$\alpha = \alpha_0 \approx \sqrt[4]{M}, \quad (\text{П.9})$$

где  $M = \frac{5 \cdot 10^4 \left(\frac{\delta}{\lambda}\right) \gamma_0^3}{P_0 [\text{МВт}] \cdot (\gamma_0 + 1)}$  коэффициент, учитывающий соотношение мощности потерь и мощности пучка. Обозначения те же, что в (П.3), (П.4) и (П.6).

Коэффициент усиления при этом условии максимален и равен (П.10).

$$K_p = \frac{3}{2\sqrt{M}} \cdot \frac{\eta_{эл}}{\left(1 + \frac{1}{\gamma_0}\right)} \cdot \frac{1}{\gamma^2 \alpha} \quad (\text{П.10})$$

Предельный коэффициент усиления  $K_p = K_{max}$  при  $P_0 = P_{max}$  и  $\eta_{эл} \approx 0,9$  составит (П.10а):

$$K_{max} \approx \frac{5 \cdot 10^{-6}}{\gamma^2 \alpha} \sqrt{\left(\frac{\lambda}{\delta}\right) \frac{P_{max} [\text{Вт}]}{\gamma_0 (\gamma_0 + 1)}} \quad (\text{П.10а})$$

Обозначения те же, что и в (5).



Для резонатора развертки, выполненного из меди, и значений  $P_{max}$ , соответствующих табл. I, значения коэффициентов усиления гирокона даны в таблице 4.

Таблица 4.

Значения предельного коэффициента усиления ( $K_{max}$ ) (в раз), достижимые при различных ускоряющих напряжениях ( $U_0$ ) и на различных волнах ( $\lambda$ ) для  $\gamma \alpha = 0,1$

$U_0$	500 кВ	1000кВ	1500кВ	2000кВ	3000кВ
$P_{max}$	8 МВт	70МВт	270МВт	720МВт	3000МВт
$\lambda = 165$ см	410	870	1300	1700	2600
$\lambda = 70$ см	340	700	1100	1400	2100
$\lambda = 30$ см	270	570	860	1100	1700
$\lambda = 10$ см	200	430	650	850	1300

Для максимальной мощности пучка при  $\frac{D}{L} = \frac{1}{40}$  (см. (3)).

$$M = 3 \cdot 10^4 \left(\frac{D}{\lambda}\right) \sqrt{\gamma_0^2 - 1} \left(\frac{\gamma_0}{\gamma_0^2 - 1}\right)^3 \quad (\text{П. II})$$

В (П. IO) и (П. II) обозначения те же, что в (5).

Условие (П. 9) и оценки (П. IO) и (П. IOa) получены из формул (П. 5) и (П. 7) в предположении  $\alpha \lesssim 0,6$  (угол пролета  $\lesssim 70^\circ$ ) и применимы при  $M \lesssim 0,15$ . Сравнение с точным значением мощности возбуждения дает погрешность оценки (П. IOa) не более 20%. При  $M \approx 0,5$  погрешность возрастает вдвое.

5. В развертываемом устройстве с пассивным резонатором (рис. 4) выигрыш по усилению в соответствии с (П. IO) составит  $\left(\frac{\gamma \alpha_1}{\gamma \alpha_2}\right)^2$  (здесь  $\alpha_1, \alpha_2$  углы отклонения в активном и пассивном резонаторах). Для оценки этого выигрыша определим мощность, которую отдает в пассивный резонатор электронный пучок, предварительно развернутый на угол  $\alpha_1$ . Эта мощность ( $P_{п}$ ) связана с изменением энергии электрона ( $\frac{E}{\gamma}$ ) соотношением (П. 6), а величина ( $\frac{E}{\gamma}$ ) может быть найдена из (I. 4)<sup>ж)</sup> по известным начальным условиям входа электрона в пассивный резонатор. Приравняв мощность  $P_{п}$ , поступающую в пассивный резонатор, мощ-

ж) см. Приложение I.

ности, теряемой в его стенках (П. 4) и создающей напряжение ( $U_{т}$ ), необходимое для отклонения пучка на угол  $\alpha$  (П. 3), получим при оптимальных (по П. 9) зазорах в обоих резонаторах<sup>ж)</sup> выражение для оценки выигрыша в коэффициенте усиления (П. I2) /П-17/.

$$\frac{\gamma \alpha_1}{\gamma \alpha_2} \approx \frac{\left(\frac{\pi c}{\beta_0 \lambda} + \alpha_0\right) \cos \alpha_0 - \frac{1}{2} \sin \alpha_0}{1 - \alpha_0 \alpha_1 \gamma \alpha_0} \quad (\text{П. I2})$$

$l$  - расстояние между резонаторами (рис. 4).

$\lambda$  - резонансная длина волны

$\beta_0 = \frac{\sqrt{\gamma_0^2 - 1}}{\gamma_0}$ ,  $\gamma_0$  - релятивистский фактор,

$\alpha_0 = \sqrt{M}$  - значение M приведено в (П. II).

Для  $\alpha_0 \lesssim 0,6$ ,  $l = \frac{\lambda}{2}$ ,  $\beta_0 \rightarrow 1$   $\frac{\gamma \alpha_1}{\gamma \alpha_2} \approx 10$

6. Энергетический разброс электронов при развертке пучка оценивается по изменению энергии электрона ( $\frac{E}{\gamma}$ ), находящегося на краю пучка. Из соотношения (П. I) для электрона с начальными координатами ( $x_0, y_0$ ) получим оценку (П. I3).

$$\frac{\Delta U}{U_0} \approx \frac{2\pi z_0}{\lambda} \sqrt{\frac{\gamma_0 + 1}{\gamma_0 - 1}} \cdot \gamma \alpha \quad (\text{П. I3})$$

Здесь  $\pm e \Delta U$  - максимальный энергетический разброс,  $e$  - заряд электрона,  $z_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$ ,

$\lambda$  - резонансная длина волны,

$\gamma_0$  - релятивистский фактор.

В (П. I3) предполагается, что угол отклонения ( $\alpha$ ) мал ( $\gamma \alpha^2 \ll 1$ ). Для пучка диаметром  $D = 0,05 \lambda$  ( $z_0 = \frac{D}{2}$ ) при  $\gamma_0 = 2$  и  $\gamma \alpha = 0,1$ ,  $\frac{\Delta U}{U_0} \approx 0,03$ , что соответствует снижению электронного КПД (4) на эту величину. Результаты оценки по (П. I3) показывают, что энергетический разброс электронов при

ж) Выигрыш в коэффициенте усиления такой схемы оказывается максимальным, если величина пролетного зазора каждого из резонаторов равна оптимальной, найденной из условия минимума  $P_{ex}$  (П. 9) при работе резонатора в обычной схеме развертки.



развертке пучка позволяет пренебречь таким фактором снижения КПД; как неполное торможение электронов при выходе пучка на коллектор.

Неполное торможение необходимо для того, чтобы предотвратить образование виртуального катода в выходной щели кольцевого резонатора. Оценка (П.14), которая следует из данных для предельного тока ленточного пучка /Л-18/ в щели выходного резонатора с радиусом средней линии щели -  $r_m$ , шириной щели -  $2$  при толщине пучка  $\frac{2}{2}$ , дает для остаточной энергии  $U_k$  значение

$$\frac{U_k}{U_0} \leq 1 + 2\% \left( \frac{2}{r_m} - \text{в соответствии с табл. I, } \frac{2}{r_m} = \frac{1}{40}, \frac{2}{r_m} = 0,05 \lambda \right)$$

$$\frac{U_k}{U_0} \approx \left[ \frac{2 \cdot 2 \left( \frac{2}{r_m} \right)^2}{r_m} \right]^{\frac{2}{3}} \left( \frac{e}{m c^2} \cdot \frac{U_0}{2} + 1 \right) \quad (\text{П.14})$$

Обозначения, кроме приведенных выше, см. в (3) и (4).

### П Р И Л О Ж Е Н И Е Ш

#### Оценка минимальной рабочей волны гирокона

Если выбрать пролетный зазор выходного резонатора гироконна из условий минимальной напряженности электрического поля для заданной энергии пучка, возбуждающего резонатор с электронным КПД равным единице, получим следующую связь между минимальной рабочей длиной волны ( $\lambda_{min}$ ) и допустимой напряженностью электрического поля в выходном резонаторе ( $E_{max}$ ) (Ш.1) /Л-16/.

$$\lambda_{min} = \frac{1,6 \sqrt{\gamma_0^2 - 1}}{E_{max} \left[ \frac{MB}{cm} \right]} \cdot \cos \psi \quad (\text{Ш.1})$$

Здесь  $\psi$  - угол, под которым электроны влетают в выходной резонатор (2),  $\gamma_0$  - начальная относительная энергия электронов.

Так как возможны варианты конструкции гироконна, в которых  $\psi = 0$ , принимаем для оценок  $\cos \psi = 1$  (6).

Результаты расчета по ф-ле (6) приведены в табл.5.

Таблица 5

Минимальная рабочая волна гироконна в сантиметрах для различных ускоряющих напряжений источника электронов ( $U_0$ ).

	$U_0 = 500 \text{кВ}$	$U_0 = 1000 \text{кВ}$	$U_0 = 1500 \text{кВ}$	$U_0 = 2000 \text{кВ}$	$U_0 = 3000 \text{кВ}$
$E_{max} = 0,1 \frac{MB}{cm}$	30	45	60	80	110
$E_{max} = 0,5 \frac{MB}{cm}$	6	9	12	16	22



## П Р И Л О Ж Е Н И Е I V

### Оценка магнитного поля и его дефокусирующего действия для отклоняющей системы в виде "уединенного" полюса в радиальном гироконе

Представим магнито-статическую систему - 5 (рис.3) в виде "уединенного" полюса электромагнита. Это представление близко к действительности лишь на тех участках траекторий электронов, которые расположены вблизи полюса, но именно здесь магнитное поле максимально и наиболее сильно проявляет свое дефокусирующее действие. При такой идеализации можно воспользоваться результатами анализа движения электрона в поле магнитного заряда /Л-19/.

Положим, что магнитный заряд  $-e_m$  равномерно расположен на поверхности сферы радиуса  $a$ , создавая на ней магнитную индукцию  $B = \frac{-e_m}{4\pi a^2}$ . Центр сферы (т.н. отклоняющий полюс) лежит на оси гирокона на расстоянии  $l$  от центра резонатора развертки, из которого под углом  $\alpha$  к оси движется электрон. Траектория этого электрона в соответствии с /Л-19/ описывается в сферической системе координат  $(R, \theta, \varphi)$  уравнением (IV.1)

$$\frac{l}{R} = \cos[(\varphi_m - \varphi) \sin \theta] \quad (IV.1)$$

Здесь  $l = l \sin \alpha$  - прицельный параметр - минимальное расстояние отклоняющего полюса от траектории,

$$\varphi_m = \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \frac{1}{\sin \theta},$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{l}{a^2} \cdot \frac{mc^2}{e} \cdot \frac{\sqrt{\gamma_0^2 - 1}}{Bc}, \quad (IV.2)$$

$m, e$  - масса и заряд электрона,

$c$  - скорость света,  $\gamma_0$  - релятивистский фактор.

Уравнение (IV.2) определяет поверхность конуса ( $\theta = \text{const}$ ), на которой лежит траектория. Прямая  $OO'$  (рис.IV.1) является осью конуса. Для радиального гирокона  $\operatorname{tg} \theta = 1$  и траектория электрона касается плоскости экватора (плоскость  $OXY$  на рис.IV.1).

в точке  $\varphi = \pi$ ,  $R = \frac{l}{\cos\left[\frac{1}{\sin \theta} \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right)\right]}$ . Будем полагать, что после касания этой плоскости электрон движется по прямой, лежащей в ней (пунктир на рис.IV.1). Такой произвольное "спрямление" траектории качественно учитывает действие магнитного заряда противоположного знака в областях, удаленных от полюса. Количественно оно приводит к завышению магнитного поля, требуемого для отклонения пучка, что пригодно для грубой оценки. Из выражения (IV.2) при  $\operatorname{tg} \theta = 1$  получим величину магнитной индукции на поверхности сферы

$$B = \frac{l}{a^2} \cdot \frac{mc^2}{e} \cdot \frac{\sqrt{\gamma_0^2 - 1}}{c}$$

На расстоянии  $R = l$  от полюса магнитная индукция в  $\left(\frac{l}{a}\right)^2$  раз меньше. Подставляя значения постоянных  $\frac{mc^2}{e} = 5,11 \cdot 10^5$  [В]

$c = 3 \cdot 10^{10}$   $\left[\frac{\text{см}}{\text{сек}}\right]$  и учитывая  $l = l \sin \alpha$ , получим формулу (IV.3)

$$B_l \cong 1700 \frac{\sqrt{\gamma_0^2 - 1}}{l[\text{см}] \cdot \sin \alpha} [\text{Гс}]. \quad (IV.3)$$

Обозначения см. на рис. IV.2.

В цилиндрическом сердечнике электромагнита (рис.IV.2), реализующего "уединенный" полюс, магнитная индукция ( $B_m$ ) вдвое выше, чем на сферической поверхности полюса, поэтому:

$$B_m = 2 B_l \left(\frac{l}{a}\right)^2 \quad (IV.4)$$

Если предположить, что для обеспечения хорошего токопрохождения зазор между поверхностью полюса и границей пучка равен минимальному диаметру сечения луча (рис.IV.1), то магнитная индукция в центре пучка при  $\operatorname{tg} \alpha = 0,1$  составляет, (IV.3),  $B_l \cong 3 \cdot 10^3$  Гс для радиального гирокона, с ускоряющим напряжением  $U_0 = 1500$  кВ и рабочей волной  $\lambda = 30$  см. В магнитном сердечнике (рис.IV.2) индукция при этих условиях будет приблизительно в 6 раз выше. Действительно, для  $a = l - \frac{3}{2} D_{\min}$ ,

$l = 0,75 \lambda$ ,  $D_{\min} = 0,02 \lambda$ , где  $l$  - расстояние до полюса (рис.IV.2),  $D_{\min}$  - диаметр пучка в кроссовере,  $\lambda$  - длина



волны гирокона,

$$B_m \cong 6 V_e$$

При оценке дефокусирующего действия поля магнитного заряда положим, что электроны, лежащие на границе пучка в кроссовере, имеют ту же начальную координату, что и электрон на оси пучка. Такое произвольное добавление углов, приводит к завышению азимутальной расходимости пучка. Полагая далее, что кроссовер находится на прицельном расстоянии осевого электрона от полка (т.е. при  $R = \varrho$ ) и диаметр пучка в кроссовере  $-D_{min}$  (рис. IV.2), получим, что начальные направления крайних траекторий пучка расходятся по азимуту на угол  $\delta\vartheta \cong \frac{D_{min}}{\varrho}$  (см. рис. IV.1). Этот же угол образует в плоскости экватора проекции осей конусов ( $00''$ ,  $00'''$ , рис. IV.1) на поверхности которых лежат крайние траектории.

$$\delta\varphi = \delta\vartheta \cong \frac{D_{min}}{\varrho} = \frac{D_{min}}{l \sin \alpha} \quad (IV.5)$$

Для  $D_{min} = 0.02 \lambda$ ,  $l = 0.75 \lambda$ ,  $\alpha \cong 0.1$ ,  $\delta\varphi \cong 0.3$ .

Сравнение приведенных грубых оценок (IV.3) и (IV.5) с результатами точного численного расчета реальной безжелезной отклоняющей системы радиального гирокона /Л-20/, даже при заметном отличии её конструкции от изображенной на рис. IV.2, показывает, что погрешность этих оценок не превышает 50%.

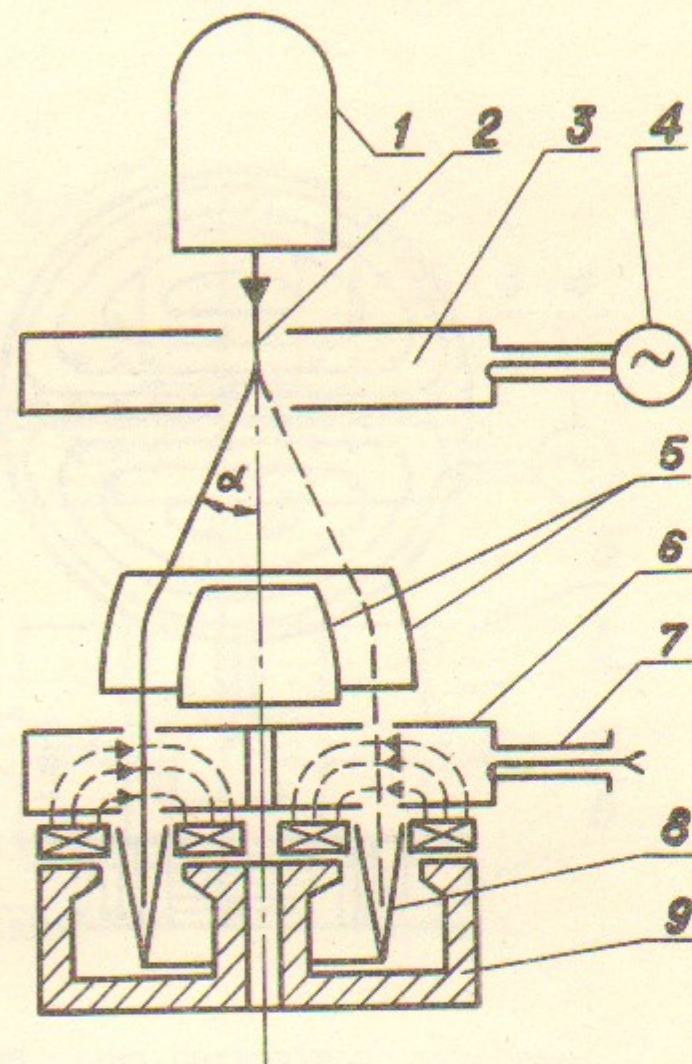


Рис. I. Конструктивная схема гирокона.

- 1 - высоковольтный ускоритель, 2 - электронный луч,  
 3 - резонатор развертки, 4 - ВЧ возбуждатель,  
 5 - электростатическая отклоняющая система,  
 6 - выходной резонатор, 7 - выводы энергии,  
 8 - коллектор, 9 - компенсирующий электромагнит  
 $\alpha$  - угол развертки, --->--- линии статического магнитного поля.



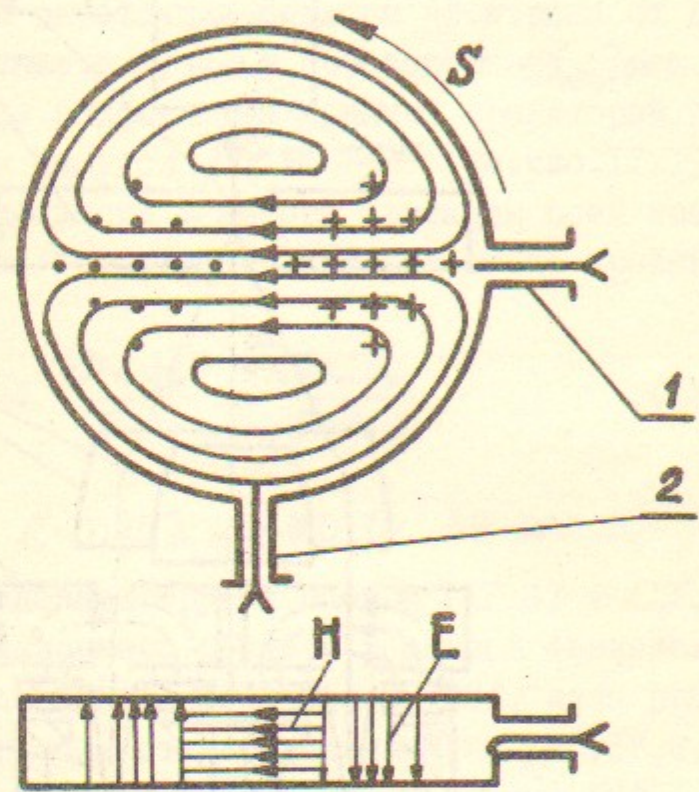


Рис.2. Резонатор развертки.

H - линии магнитного поля, E - линии электрического поля, 1,2 - вводы мощности, S - направление вращения поля.

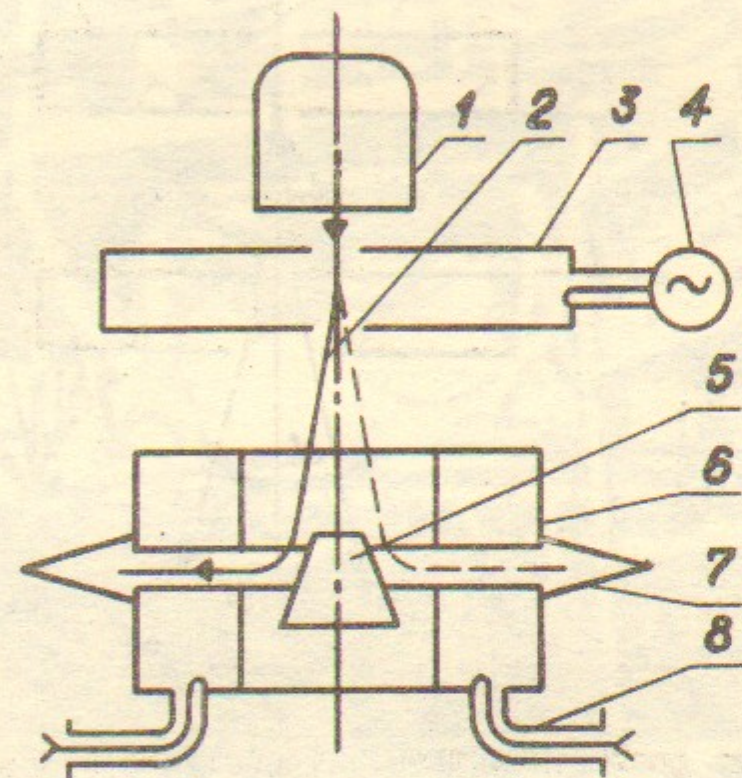


Рис.3. Конструктивная схема радиального гирокона.

1 - высоковольтный ускоритель, 2 - электронный луч, 3 - резонатор развертки, 4 - ВЧ возбуждатель, 5 - магнитостатическая отклоняющая система, 6 - выходной резонатор, 7 - коллектор, 8 - выходы энергии.



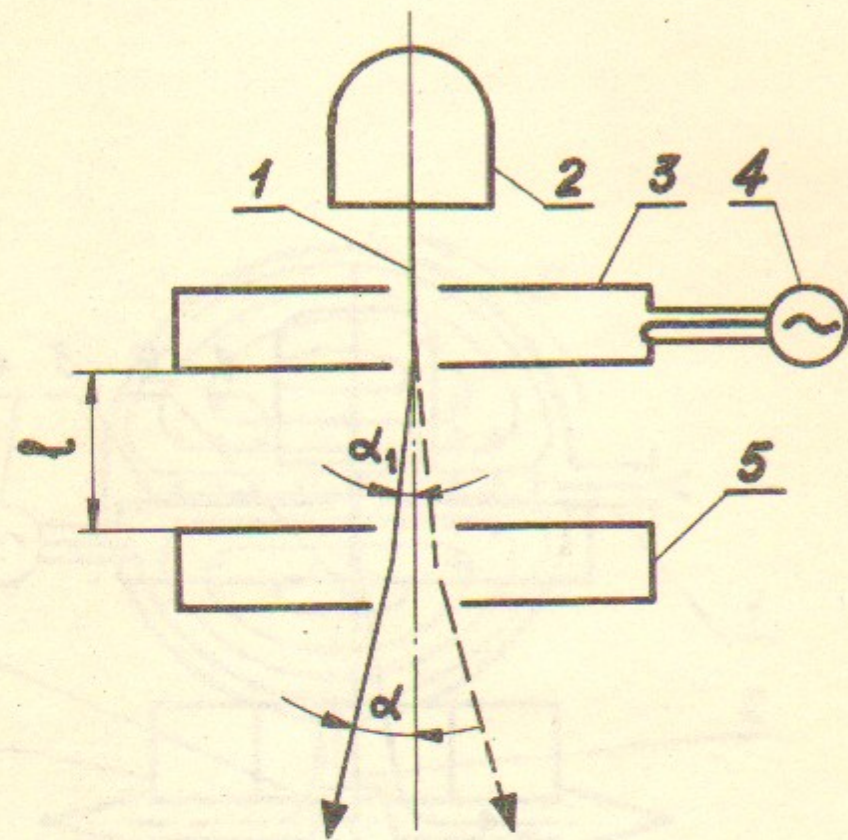


Рис.4. Схема развертывающего устройства с пассивным резонатором.

1 - электронный луч, 2 - высоковольтный ускоритель,  
3 - резонатор развертки, 4 - ВЧ возбуждатель,  
5 - пассивный резонатор.

$\alpha_1, \alpha$  - углы развертки в активном и пассивном резонаторах. При  $l \gg \frac{\lambda}{2}$   $\frac{\tan \alpha}{\tan \alpha_1} \gg 10$

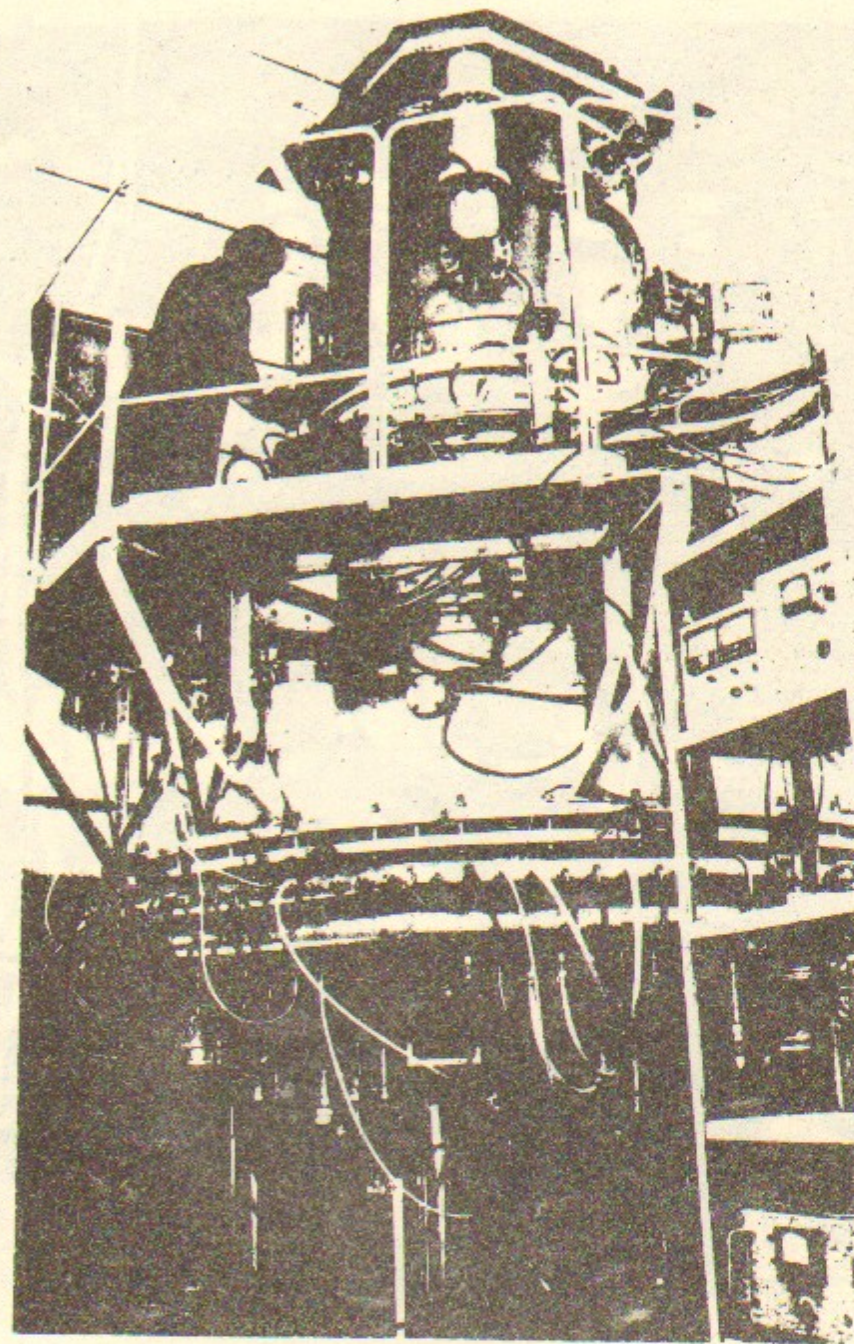


Рис.5. Гирокон непрерывного генерирования проектной мощностью 5000 кВт на частоте 181 МГц.



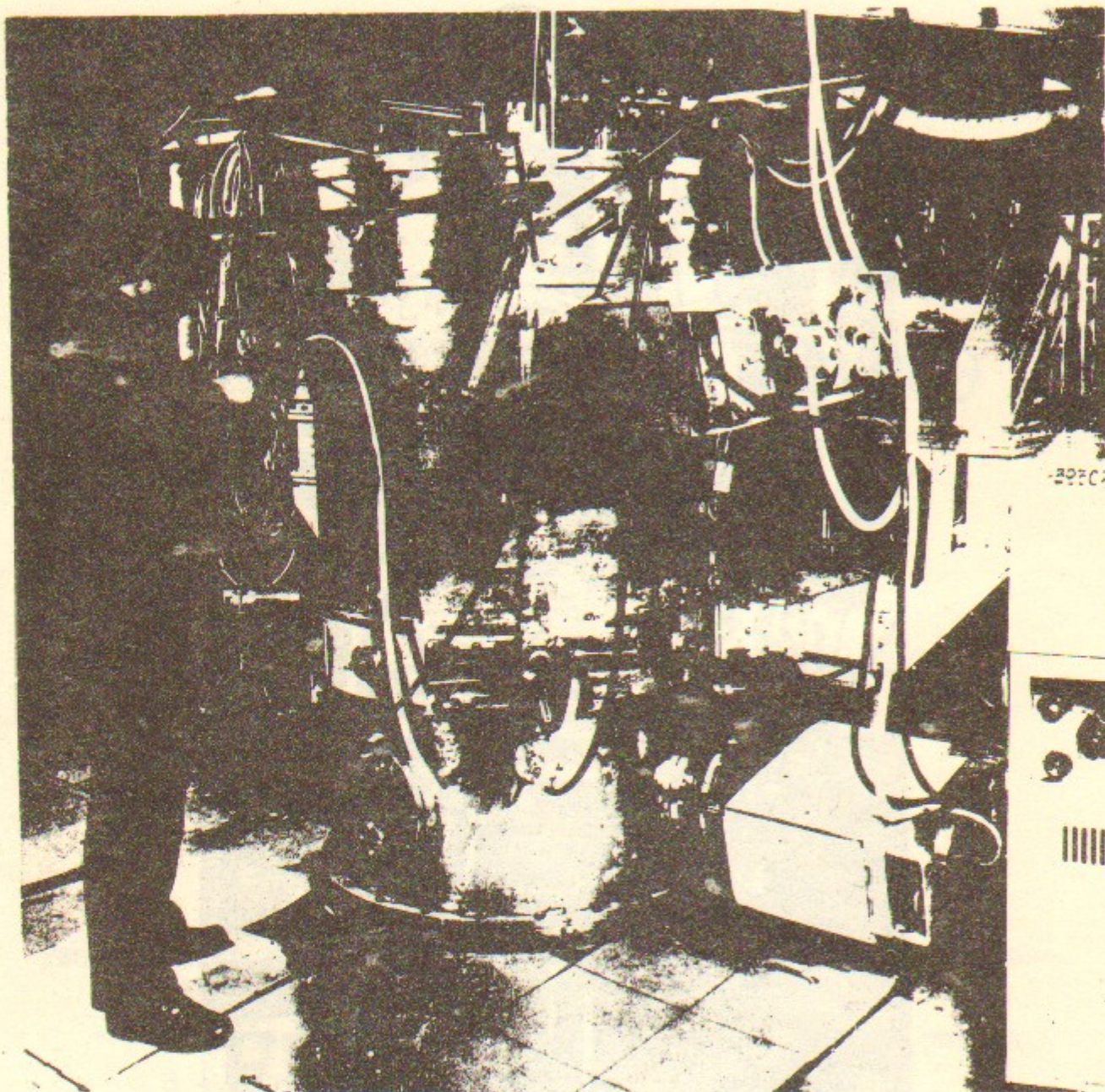


Рис.6. Импульсный гирокон проектной мощностью 200 МВт на частоте 430 МГц.

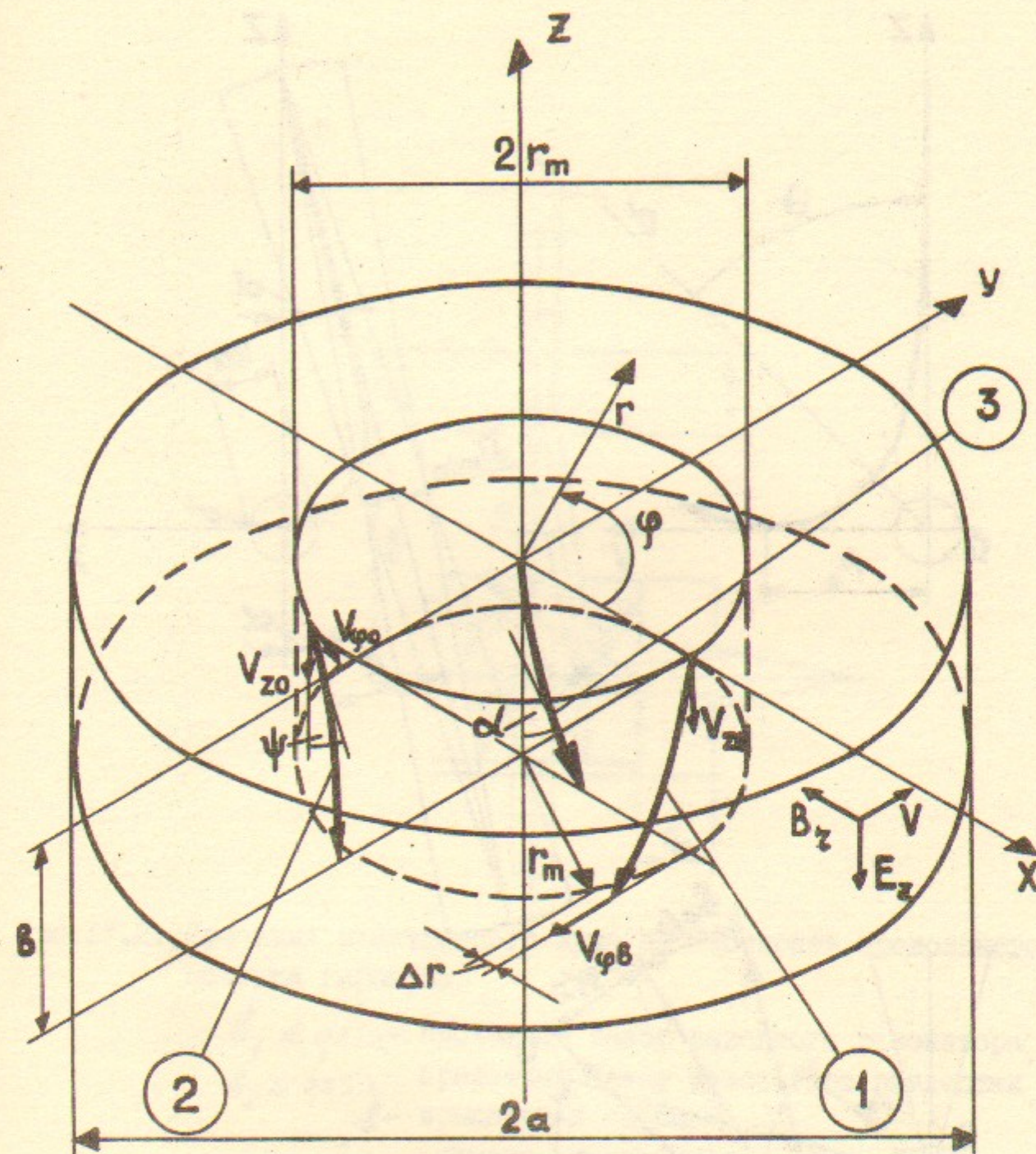


Рис.1.1. Траектории электронов в цилиндрическом резонаторе с бегущей волной, образованной колебаниями типа  $E_{\text{H}10}$ .  
 1 - Траектория электрона  $\alpha$ , возбуждающего резонатор.  
 2 - Траектория возбуждающего электрона с начальной скоростью, компенсирующей действие радиального магнитного поля.  
 3 - Траектория электрона при развертке.  
 $\alpha$  - радиус резонатора,  $b$  - пролетный зазор.



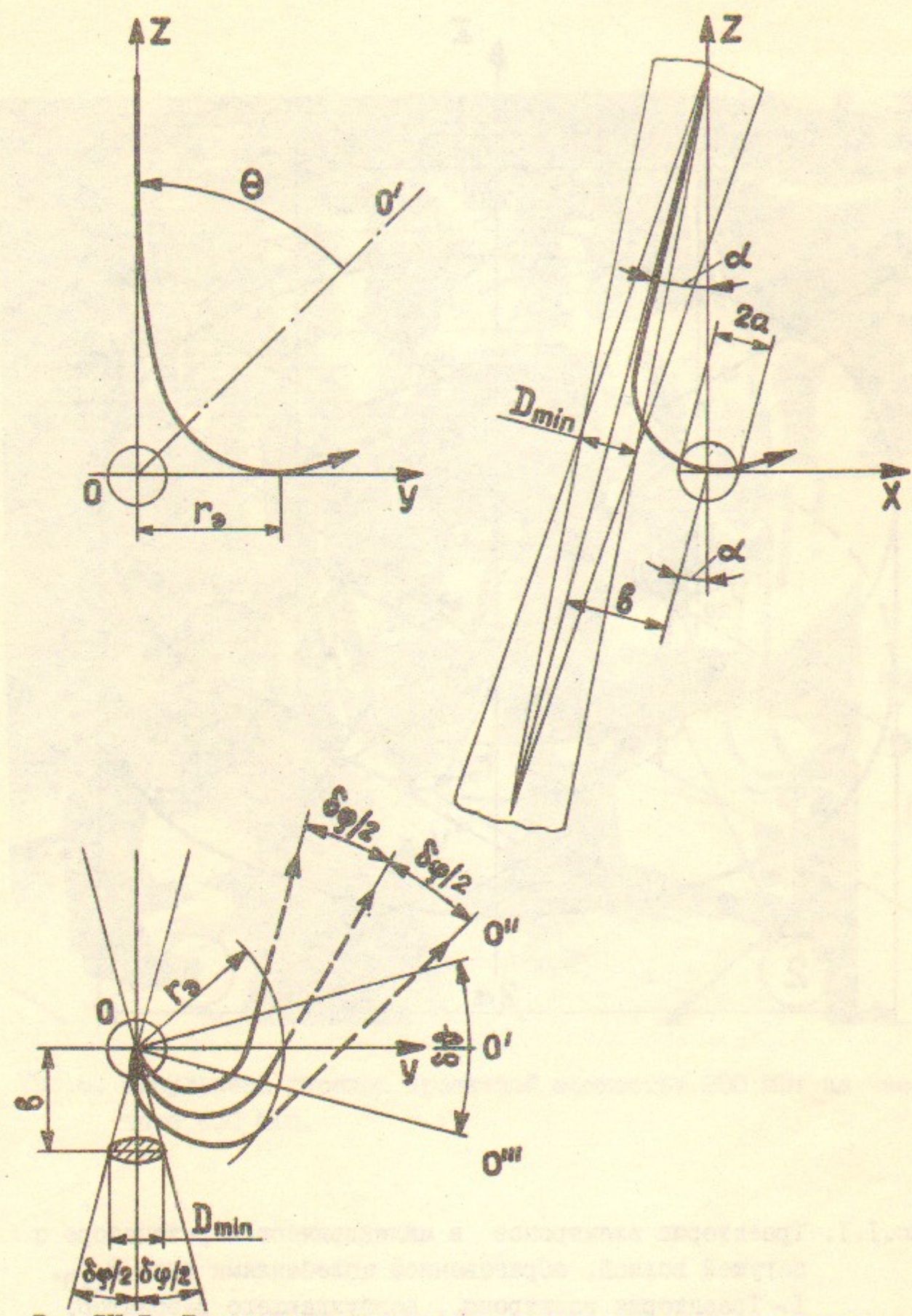


Рис.IV.1. Траектории электронов в поле магнитного заряда.

- $\alpha$  - угол отклонения луча при развертке,
- $\delta\theta = \delta\varphi$  - азимутальный размер луча,
- $b$  - прицельный параметр,
- $2a$  - диаметр отклоняющего полюса,
- $D_{min}$  - диаметр луча в кроссовере,
- $r_0$  - координата точки касания траекторией плоскости XY.

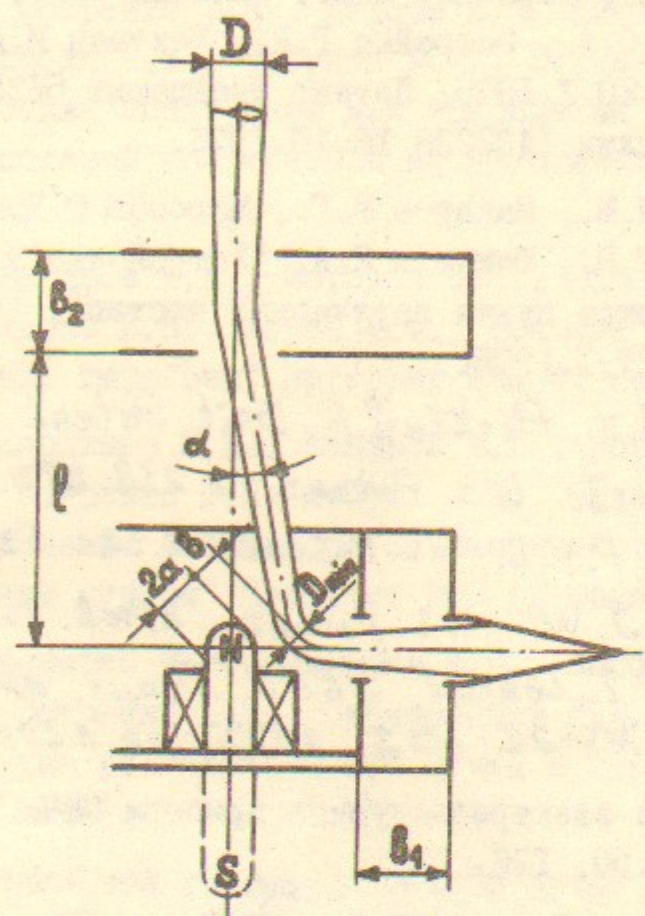


Рис.IV.2. Проекция электронного луча на плоскость продольного сечения гирокона.

- $b_1 \leq 0,25\lambda$  - пролетный зазор выходного резонатора,
- $b_2 \leq 0,25\lambda$  - пролетный зазор резонатора развертки,
- $b$  - прицельный параметр,
- $2a$  - диаметр отклоняющего полюса,
- $\alpha$  - угол отклонения луча при развертке,
- $l$  - расстояние до отклоняющего полюса,
- $D_{min}$  - диаметр луча в кроссовере.



### Л и т е р а т у р а

1. Будкер Г.И., Карлинер М.М., Макаров И.Г., Морозов С.Н., Нежевенко О.А., Острейко Г.Н., Шехтман И.А., Патент США 3.885.193 20.У.1975, Патент Швейцарии 562533 30.У.1975, Патент Англии 1432236 18.УШ.1976.
2. Карлинер М.М., Макаров И.Г., Морозов С.Н., Нежевенко О.А., Острейко Г.Н., Шехтман И.А. "Устройство для получения круговой развертки пучка заряженных частиц", Авт.свидетельство № 471847 27.1.1975.
3. *Whale A.V., Pickin J.R. Brit. Patent 954.840. VIII. 1964*
4. *Kaufmann J. US Patent 3.219.873. XI. 1965*
5. *Hartley P.V.L. US Patent 2.381.539. VIII. 1945*
6. *Mc Rae J.W. US Patent 2.408.437. X. 1946*
7. *Gerhard T. Conzad, IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. NS-22, No 3, 1975, pp 1249-1252*
8. Сб. Мощные электровакуумные приборы СВЧ. Ред. Клэмпитт "Мир" 1974, стр.50, 126.
9. Мешков И.Н., Чириков Б.В., ЖТФ, XXXV вып.12., 1965, стр.2202.
10. Клеен В. Введение в электронику СВЧ. "Сов.радио", М., 1963, стр.443.
11. Будкер Г.И., Морозов С.Н., Нежевенко О.А., Острейко Г.Н., Шехтман И.А., Патент США 4.019.088, 19.1У.1977г.
12. Карлинер М.М., Козырев Е.В., Макаров И.Г., Морозов С.Н., Нежевенко О.А., Острейко Г.Н., Шехтман И.А., "Гирокон" Авт.свидетельство № 503444 22.Х.1975.
13. Будкер Г.И., Гапонов В.А., Горникер Э.И., Карлинер М.М., Кузнецов Н.А., Макаров И.Г., Морозов С.Н., Нежевенко О.А., Нехаев В.Е., Николаев В.С., Острейко Г.Н., Резаков А.Н., Салимов Р.А., Сердобинцев Г.В., Серов А.Ф., Шехтман И.А., Эстрин Б.С. "ВЧ система электрон-позитронного накопителя ВЭП-4 на основе гирокон - мощного УКВ генератора с негруппированным релятивистским пучком". Доклад на У Всесоюзной конференции по ускорителям заряженных частиц. Дубна Х.1976.
14. Будкер Г.И., Вассерман С.Б. Вещеревич В.Г., Гришанов Б.И., Карлинер М.М., Ключев В.Ф., Козырев Е.В., Макаров И.Г., Нежевенко О.А., Острейко Г.Н., Персов Б.З. Радченко В.М., Салимов Р.А., Фомель Б.М., Чибуков Ю.Я., Шехтман И.А., Яснот Г.И. "Источник позитронов для накопителя ВЭП-4". Доклад на V Всесоюзной конференции по ускорителям заряженных частиц, Дубна Х.1976 г.
15. Карлинер М.М., Макаров И.Г., Морозов С.Н., Нежевенко О.А., Острейко Г.Н. Персов Б.З., Серов А.Ф., Шехтман И.А. "Импульсная модель гирокон" Препринт ИЯФ (в печати).
16. Горникер Э.И., Карлинер М.М., Макаров И.Г., Морозов С.Н., Нежевенко О.А., Острейко Г.Н. Петров В.М., Шехтман И.А. "Возбуждение выходного резонатора гирокон негруппированным релятивистским пучком" Препринт ИЯФ (в печати).
17. Карлинер М.М., Козырев Е.В., Макаров И.Г., Морозов С.Н., Нежевенко О.А., Острейко Г.Н., Сердобинцев Г.В., Шехтман И.А. "Круговая развертка релятивистского пучка в гироконе". Препринт ИЯФ (в печати).
18. Бахрах Л.Э. "Предельный ток электронного пучка в предположении постоянства плотности пространственного заряда" Радиотехника и электроника 1965 № 6, стр.1004.
19. Богуславский С.А. "Избранные труды по физике" М., 1961, стр.162.
20. Будкер Г.И., Горникер Э.И., Карлинер М.М., Макаров И.Г., Морозов С.Н., Нежевенко О.А., Николаев В.С., Острейко Г.Н., Серов А.Ф., Шехтман И.А. "Радиальный гирокон непрерывного генерирования мощностью выше 1000 кВт на волне 165 см" Препринт ИЯФ (в печати).
21. Будкер Г.И., Карлинер М.М., Козырев Е.В., Макаров И.Г., Морозов С.Н., Нежевенко О.А., Острейко Г.Н., Персов Б.З., Сердобинцев Г.В., Серов А.Ф., Шехтман И.А. "Гирокон мощностью более 100 МВт в импульсе микросекундной длительности на волне 70 см". Препринт ИЯФ (в печати).