

Реакция гиротрона на малое отражение от нестационарной нагрузки

Н. К. Харчев, Г. М. Батанов, Ю. Ф. Бондарь, Л. В. Колик, К. А. Сарксян
Институт общей физики им. А. М. Прохорова, РАН, Москва, Россия

А. Фернандез, А. В. Толкачёв
Национальная лаборатория по УТС, ЕВРОАТОМ-СИЕМАТ, г. Мадрид, Испания

Ю. В. Новожилова, М. И. Петелин
Институт прикладной физики, РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Исследовано взаимодействие гиротрона со слабо отражающей колеблющейся удаленной мембраной. По окончании переходного процесса, длительность и характер которого зависят от очередности включения гиротрона и акустического модулятора мембраны, мощность генератора становится модулированной с частотой колебаний нагрузки. При перемещении мембраны вдоль луча на половину длины волны сценарий взаимодействия генератора с нагрузкой полностью воспроизводится.

PACS: 07.50.-e

Ключевые слова: гиротрон, нестационарная нагрузка, акустический модулятор, длина волны.

Введение

В работе [1] обнаружено, что под действием волны, отраженной от низкочастотных плазменных пульсаций, спектр гиротрона расширялся, что

объяснялось как захват гиротрона отраженной волной. Для более детального исследования эффектов воздействия на гиротрон отражения от нестационарной нагрузки в [2] было предложено использовать в качестве отражателя мембрану,

осциллирующую с фиксированными амплитудой и частотой. Результаты такого исследования описываются в данной работе.

Очевидно, что если в системе генератор — линия запаздывания — нагрузка один из параметров начинает меняться с некоторым периодом, то через некоторое время с тем же периодом будут модулированы мощность и частота генератора. Время установления и глубина модуляции мощности в установившемся режиме будут определяться величиной коэффициента отражения от осциллирующей нагрузки, а также фазовым сдвигом излученной и отраженной волн на выходе автогенератора. Для квазимонохроматического процесса при перемещении отражателя на половину длины волны фаза отраженного сигнала сдвигается на 2π , и поведение системы полностью воспроизводится.

Теоретические оценки эффектов взаимодействия автогенератора со слабо отражающей нагрузкой

Рассмотрим случай, когда параметры системы постоянны во времени и коэффициент отражения от нагрузки R достаточно мал [3, 4]

$$|R| \vartheta_0 > Q, \quad (1)$$

так что в системе генерируется единственная устойчивая мода. В (1) ϑ_0 — фаза запаздывания отраженной волны, Q — добротность электродинамической системы генератора.

В работах [3, 4] исследована модель генератора Ван-дер-Поля, в которой отсутствует реактивная часть проводимости, вносимой в резонатор активной средой (в гиротроне — электронным пучком). В соответствии с принципом причинности — соотношениями Крамерса—Кронига [5] любая среда наряду с активной имеет и реактивную составляющую проводимости. Однако обе эти составляющие для резонансной активной среды (в гиротроне — для пучка вращающихся электронов) являются величинами одного порядка, поэтому условие (1) с точностью до множителя порядка единицы остается справедливым и для реального генератора.

Оценим сдвиг частоты и добротности рабочей моды резонатора гиротрона под воздействием отражения от нагрузки. Резонатор гиротрона представляет собой отрезок слабонерегулярной металлической трубы, сопряженной с выходным волноводом (рис. 1). Для расчетов поправок частоты и добротности удобно воспользоваться методом, описанным в работе [6]. Этот метод предполагает нахождение некоторого опорного сечения (см. Приложение 1). Отражение от удаленной на-

грузки эквивалентно заданию комплексного коэффициента отражения $R = |R|e^{-i\varphi}$ в этом опорном сечении. Если отражение мало $|R| \ll 1$, то возникающие из-за него поправки к добротности и частоте основной продольной моды резонатора в рамках метода возмущений пропорциональны модулю коэффициента отражения $|R|$ (см. Приложение 1):

$$\frac{\Delta Q}{Q} = -2|R| \cos \varphi, \quad \frac{\Delta \omega}{\omega} = \frac{|R|}{Q} \sin \varphi. \quad (2)$$

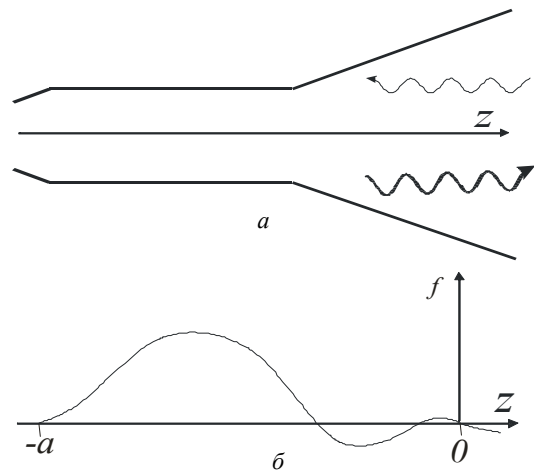


Рис. 1. Резонатор гиротрона, сопряженный с выходным волноводом (а); структура поля, возбуждаемого внешним монохроматическим источником и опорное сечение при $z = 0$ (б)

Отметим, что под коэффициентом отражения в (1), (2) подразумевается отношение амплитуды отраженной волны, имеющей такую же структуру, в том числе такое же направление вращения, как рабочая мода генератора, к амплитуде излученной волны.

При смещении нагрузки (отражающего зеркала) вдоль направления распространения волн смещается фаза отраженной волны. На такую же величину смещается фаза φ коэффициента отражения, заданного в опорном сечении. В частности, при сдвиге удаленного отражателя на половину длины волны фаза отраженной волны, а значит, и фаза φ коэффициента отражения меняются на 2π . В этом случае, как следует из (2), система возвращается в предыдущее состояние.

Поскольку добротность электродинамической системы входит в уравнение

$$P = \omega W / Q, \quad (3)$$

W — энергия поля, запасенная в резонаторе, то изменение добротности приводит к изменению мощности излучения P .

Изложенная стационарная теория остается справедливой до тех пор, пока характерное время изменения любого параметра много больше времени переходных процессов в системе. Однако

при малом коэффициенте отражения самым длительным переходным процессом становится захват генератора отраженной волной, поскольку время захвата обратно пропорционально амплитуде отраженной волны [7—10]. Условие применимости стационарной теории при этом нарушается, хотя установившаяся выходная мощность будет модулирована с той же частотой, что и параметр. Время захвата, как показано в Приложении 2, равно

$$\tau_{lock} \sim \frac{Q_{difr}}{|R|\omega}. \quad (4)$$

Заметим, что как следует из сопоставления (4) и (1), в процессе захвата волна успевает многократно отразиться от нагрузки.

Экспериментальные результаты

На рис. 2 представлена эквивалентная схема эксперимента. В тракте, работающего на водяную нагрузку гиротрона, под углом 45° к оси пучка была установлена пластина слюды с коэффициентом отражения по амплитуде 17,3 %. Частота гиротрона составляла 51,7 ГГц. Отраженная от слюды волна попадала на алюминиевую фольгу (мембрану), приклеенную на диффузоре акустического модулятора, который мог перемещаться вдоль своей оси. Подача переменного напряжения фиксированной частоты на акустический модулятор приводила к колебаниям фольги. Координата фольги, частота и амплитуда ее колебаний могли меняться в эксперименте в следующих пределах: среднее положение фольги могло сдвигаться на

150 мм, амплитуда — от 0 до 1,3 мм, частота — от 100 до 1200 Гц, причем амплитуда и частота менялись согласованным образом: чем выше частота, тем меньше амплитуда. Измерение мощности излучения гиротрона производилось с помощью диода. Излучение гиротрона через систему зеркал попадало на слюду, большая часть излучения проходила через слюду и поглощалась в водяной нагрузке, малая часть излучения отражалась от слюды, затем от колеблющейся мембраны, и вновь от слюды, совершая обратный путь по квазиоптическому тракту.

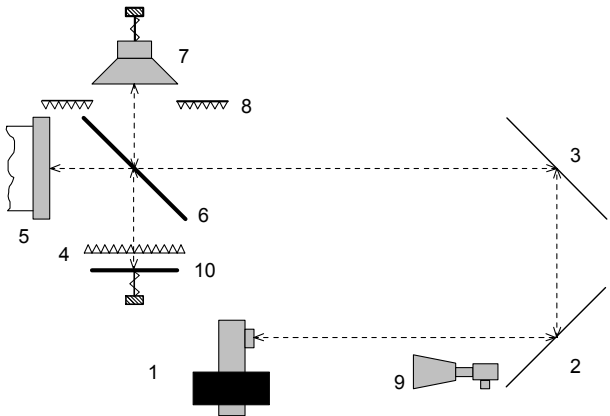


Рис. 2. Экспериментальная установка:

- 1 — гиротрон; 2, 3 — зеркала квазиоптической линии передачи СВЧ; 4, 8 — поглощающие диафрагмы; 5 — водяная нагрузка; 6 — слабо отражающая слюдяная пластина; 7 — акустический модулятор с системой перемещения; 9 — рупорная антенна с диагностическим диодом; 10 — дополнительное зеркало с системой перемещения

В экспериментах, результаты которых представлены на рис. 3—5, частота колебаний отражающей мембраны составляла 200 Гц, ее амплитуда — 1,3 мм.

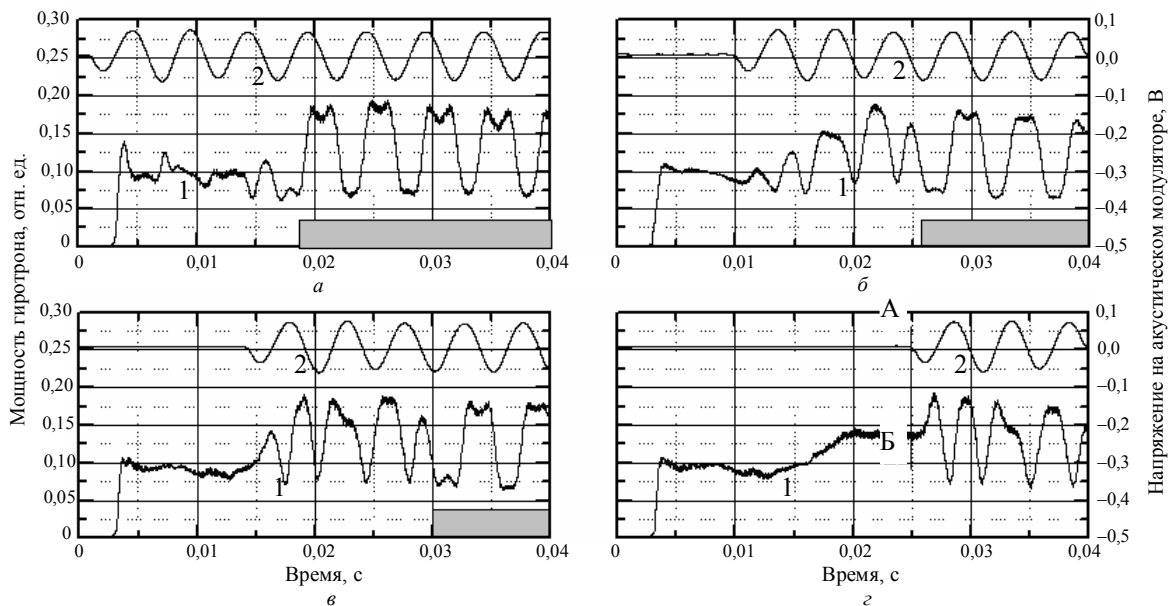


Рис. 3. Переходные процессы в гиротроне:

- a—г — задержка модуляции относительно времени включения гиротрона 0, 10, 15, 25 мс, соответственно.
- Серые прямоугольники (a—в) — режимы с установившейся мощностью гиротрона.
- Вертикальная линия А, Б (г) — время начала колебаний фольги: 1 — зависимость мощности гиротрона от времени; 2 — напряжение на акустическом модуляторе, пропорциональное координате фольги

На рис. 3 показаны процессы установления колебаний в гиротроне. Характер переходных процессов определялся очередностью включения гиротрона и акустического модулятора, а также задержкой между моментами их включения. После включения гиротрона его частота менялась из-за прогрева резонатора. В процессе прогрева гиротрон не мог быть захвачен отраженным излучением, так как время захвата было того же порядка, что и время прогрева (см. рис. 3, *з*, где процессы прогрева и захвата разделены во времени). После прогрева происходил захват гиротрона и установление режима с периодически меняющейся мощностью. Длительность захвата полностью прогретого гиротрона (см. рис. 3, *з*) составила ~ 12 мс. Величина эффективного коэффициента отражения $|R|$, входящая в формулы для оценок (1), (2), (4), является произведением коэффициента отражения от слюды R_{mica} и коэффициента трансформации T отраженной волны в волну, имеющую структуру (в том числе азимутальный индекс) рабочей моды:

$$|R| = R_{mica}T. \quad (5)$$

Поскольку дифракционная добротность резонатора гиротрона $Q \approx 1000$, коэффициент отражения от слюды составлял $R_{mica} = 0,03$ (волна отражалась дважды), можно в соответствии с формулой (4) оценить значение $|R| \sim 10^{-6}$ и вычислить по формуле (5) коэффициент трансформации: $T \sim 10^{-4} \div 10^{-5}$.

Временные зависимости мощности излучения при различных средних положениях отражающей мембраны показаны на рис. 4. На рис. 4, *а—в* виден процесс захвата генератора отраженной волной (предшествовавший захвату процесс прогрева ре-

зонатора гиротрона не показан). В соответствии со стационарной теорией изменение мощности под влиянием отражения $\Delta P_{gip}(\varphi)$ является суммой синусоидальных функций фазы φ коэффициента отражения (см. (2), (3)), а фаза $\varphi(t)$ определяется положением мембраны. В экспериментах фаза $\varphi(t)$ менялась по синусоидальному закону с периодом, равным периоду колебаний отражателя. Так как амплитуда осцилляций отражателя (1,3 мм) превышала $\lambda/8$ ($\lambda = 5,8$ мм), то в экспериментах могла наблюдаться как синусоидальная (см. рис. 4, *а, в* и рис. 5, *а—з*), так и более сложная форма модуляции мощности гиротрона (см. рис. 3; 4, *б* и 5, *д—з*). Форма и глубина модуляции мощности зависели от величины производной $\Delta P'_{gip}(\varphi)$: чем меньше производная, тем меньше глубина модуляции и сложнее ее форма.

Расчет коэффициента корреляции K между сигналом мощности гиротрона и напряжением на акустическом модуляторе, задающем колебания отражающего объекта, в зависимости от среднего положения отражателя z_{refl} дает кривую с периодом, равным $\lambda/2$ (см. рис. 4, *з*). Коэффициент корреляции рассчитывался по формуле

$$K = \frac{1}{T} \int_{-T}^T \frac{\Delta P_{gip} U_{acoust}}{\sigma_{gip} \sigma_{acoust}} dt, \quad (6)$$

где U_{acoust} — напряжение на акустическом модуляторе;

$\sigma_{gip}, \sigma_{acoust}$ — средние квадратичные отклонения модуляции мощности гиротрона и напряжения на акустическом модуляторе.

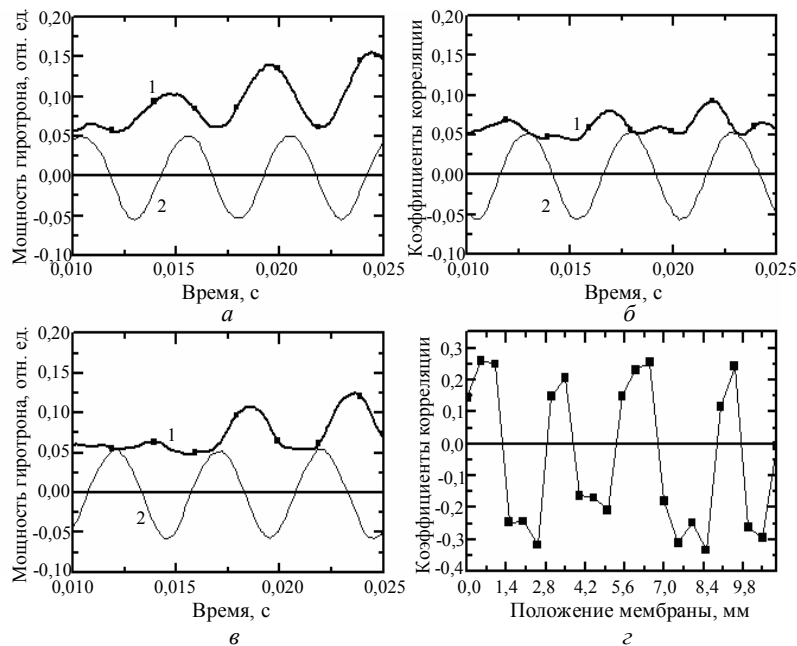


Рис. 4. Сигнал, пропорциональный выходной мощности гиротрона при разных средних положениях отражающей мембраны (*а—в*, 1), колебания отражателя (*а—в*, 2) и коэффициент корреляции между колебаниями отражающей мембраны и мощностью излучения гиротрона (*з*). Среднее положение мембраны менялось на 0,5 мм от (*а*) к (*в*)

Коэффициент корреляции согласно (6) рассчитывался на интервале времени $T = 20$ мс. Кривая $K(z_{ref})$ имеет четко выраженные скачки, которые можно связать с изменением знака производной функции $\Delta P_{gip}(\varphi)$.

При плавном уменьшении коэффициента отражения от колеблющейся мембраны глубина моду-

ляции мощности плавно спадала до нуля (см. рис. 5, $a-z$). Для проведения соответствующих экспериментов перед отражающей мембраной устанавливались шторки из поглощающего материала (см. рис. 2, поз. 8). При изменении расстояния между шторками менялась величина отраженного излучения.

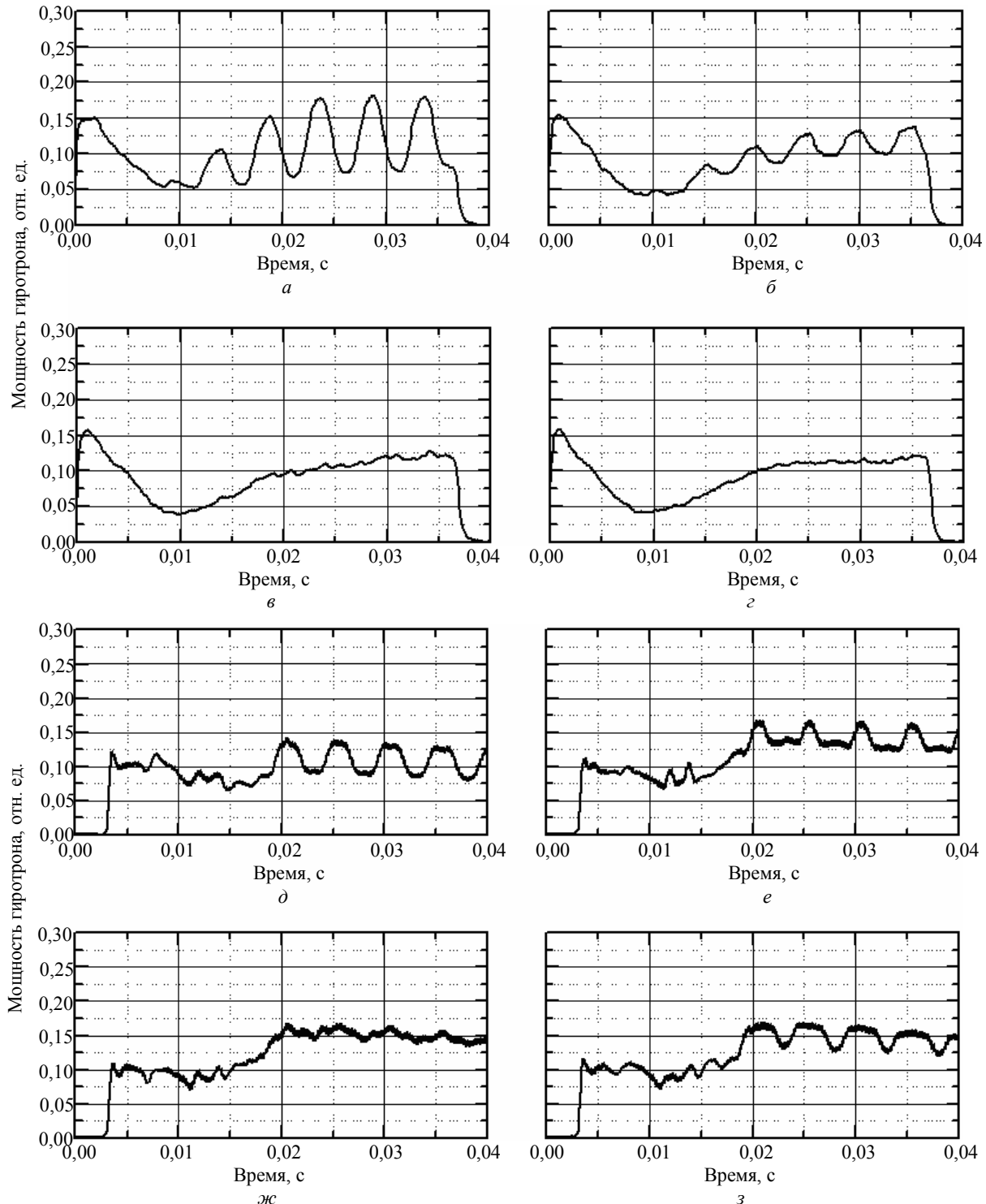


Рис. 5. Реакция гиротрона:

$a-z$ — на изменение величины отраженного сигнала: коэффициент отражения от колеблющейся мембраны по амплитуде:

a — 100%; $б$ — 70%; $в$ — 41%; $г$ — 0%;

$д-z$ — на отраженный сигнал при различных положениях дополнительного зеркала:

$д$ — 0 мм; $е$ — 0,5 мм; $ж$ — 1 мм; $з$ — 1,5 мм

При проведении экспериментов в квазиоптическом тракте устанавливали дополнительное зеркало напротив колеблющейся мембраны (см. рис. 2, поз. 10). Для этого убрали закрывающий это зеркало поглотитель (см. рис. 2, поз. 4). При наличии дополнительного зеркала помимо волны, отраженной от колеблющейся мембраны и затем совершающей обратный путь по квазиоптическому тракту к гиротрону, появлялась еще одна отраженная волна. Эта волна один или несколько раз последовательно отражалась от дополнительного зеркала и мембраны. Обе отраженные волны складывались. Перемещение зеркала приводило к сдвигу фазы одной из отраженных волн и, как следствие, изменению формы и глубины модуляции мощности (см. рис. 5, δ —3).

Заключение

В соответствии с теоретическими представлениями показано, что:

- смещение среднего положения отражателя на половину длины волны вдоль направления распространения волны приводило к воспроизведению временной зависимости мощности излучения;
- после переходного режима мощность гиротрона становилась промодулированной с периодом колебаний отражающей мембраны, если амплитуда колебаний мембраны была соизмерима с длиной волны, то форма модуляции мощности отличалась от формы колебаний мембраны.

Измерение времени захвата гиротрона отраженной волной позволило оценить коэффициент трансформации отраженной волны в рабочую моду гиротрона. Значение этого коэффициента составило $10^{-4} \sim 10^{-5}$.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

В резонаторе гиротрона и сопряженном с ним выходном волноводе на расстояниях, не слишком далеких от резонатора, где сечение близко к критическому, справедливо уравнение неоднородной струны [6, 11, 12]:

$$d^2 f / dz^2 + h^2 f = 0, \tag{7}$$

где f — функция, описывающая продольную структуру поля;

$$h(z) = \sqrt{\omega^2 / c^2 - k_{\perp}^2(z)} \text{ — продольное волновое число;}$$

$k_{\perp}(z)$ — поперечное волновое число.

Электродинамическая система в виде металлической трубы с плавно меняющимся профилем и сопряженного с ней выходного волновода пригодна в качестве резонатора гиротрона, если есть достаточно большая нерегулярность, так что поле в максимуме внутри резонатора существенно больше поля в выходном волноводе.

Интересуемся низшей продольной модой, имеющей одну вариацию поля внутри резонатора. Решение уравнения (7) на действительной частоте с нулевым граничным условием на левом конце резонатора $f|_{z=-a} = 0$ представляет собой стоячую волну (см. рис. 1) — как если бы эта волна возбуждалась в резонаторе внешним монохроматическим источником. Непрерывно меняя частоту ω в уравнении (7), найдем частоту ω_s , на которой отношение поля $f = f_s$ в пучности внутри резонатора к полю в пучности в выходном волноводе достигает максимума. В достаточно широкой части выходного волновода справедливо ВКБ-условие, и решение представляет собой сумму двух бегущих навстречу друг другу волн:

$$f_{wg} = \frac{A}{\sqrt{h}} e^{-i\theta} + \frac{B}{\sqrt{h}} e^{i\theta}, \quad \theta(z) = \int_0^z h dz'. \tag{8}$$

Определим в выходном волноводе (не слишком далеко от резонатора), где справедливо (7), но и не слишком близко, чтобы было выполнено (8), координату, где поле $f = f_s$ обращается в нуль (для определенности при $z = 0$ (см. рис. 1), и поместим в этом месте опорное сечение.

Поскольку максимальное поле внутри резонатора много больше поля снаружи, можно воспользоваться приближенными методами, изложенными в [6], и считать поправку к частоте и добротности рабочей моды. Продольная структура поля внутри резонатора близка к f_s (в том числе для решений уравнения (7) на комплексной частоте), а частота близка к частоте ω_s : $f_s \approx a_s f_s$ (a_s — амплитуда поля), $\omega \approx \omega_s$. Отношение амплитуды поля внутри резонатора к амплитуде отраженной волны, поступающей из внешнего волновода, равно:

$$\frac{a_s}{B/\sqrt{h}(0)} = \frac{c^2 f'_s(0)}{W_s \omega_s (\omega - \omega_{free})}, \tag{9}$$

где $W_s = \int_{-a}^0 f_s^2 dz$;

$\omega_{free} = \omega_s + i\omega_s''$ — частота свободных колебаний резонатора (при $B = 0$) для данной моды.

Зададим в опорном сечении комплексный коэффициент отражения $R = |R|e^{-i\varphi} = B/A$. Так как коэффициент отражения по модулю мал, поле в выходном волноводе близко к полю излученной из резонатора волны, при этом амплитуда поля в резонаторе связана с амплитудой излученной волны выражением

$$a_s = -iA\sqrt{h(0)}/f'_s(0). \tag{10}$$

Из (9) и (10) находим выражение для частоты

$$\omega - \omega_{free} = \frac{ic^2 (f'_z(0))^2 |R| e^{-i\varphi}}{W_s \omega_s h(0)}.$$

Отсюда, пользуясь формулой для добротности [4]

$$Q_q = \frac{\omega_s}{2\omega_s''} = \frac{\omega_s^2 h(0) W_s}{c^2 (f'_s(0))^2}, \tag{11}$$

получим формулы (2).

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Стационарные колебания генератора происходят с частотой ω_0 и амплитудой a_f , которые определяются из выражений

$$\omega_0 - \omega_s = -\chi_1, \quad \omega_s'' = \chi_2, \quad (12)$$

где $\chi(|a|, \omega) = \chi_1 + i\chi_2$ — функция, пропорциональная восприимчивости, вносимой электронным пучком в резонатор автогенератора.

Считаем, что время пролета электронов через резонатор много меньше времени переходных процессов в системе, поэтому зависимостью восприимчивости от частоты можно пренебречь. Тогда воздействие на генератор внешней монохроматической силы с частотой ω и комплексной амплитудой \hat{E} , согласно [7—10], описывается уравнением

$$\dot{a} + i(\omega - \omega_s - i\omega_s'')a = -i\chi a + \omega_s \hat{E}, \quad (13)$$

где a — комплексная амплитуда колебаний генератора.

Поскольку внешнее воздействие мало, уравнение (13) можно линеаризовать около состояния, соответствующего свободным колебаниям автогенератора (12). Для стационарного "захваченного" состояния получаем соотношение между приращением амплитуды колебаний $\alpha = |a| - |a_f|$ под действием внешней силы и отстройкой частоты внешнего сигнала от частоты свободных колебаний $\Delta\omega = \omega - \omega_f$:

$$i\Delta\omega a_f + i a_f \alpha (\chi'_{|a|}) \Big|_{a=a_f} = \hat{E}. \quad (14)$$

Выражение (14) описывает несимметричный эллипс на плоскости $(\alpha, \Delta\omega)$ [9, 10]. Время процесса установления этого состояния (время захвата) обратно декременту затухания возмущений при малых отклонениях от этого состояния. В соответствии с [7—9], в центре полосы захвата оно равно

$$\tau_{lock} = \left| \frac{\hat{E}}{a_f} \right|. \quad (15)$$

Выражение, аналогичное (14), может быть получено для гиротрона с бочкообразным резонатором, сопряженным с выходным волноводом, из которого поступает внешняя волна [9]:

$$i\Delta\omega a_s + i a_s \alpha (\chi'_{|a|}) \Big|_{a=a_s} = -i \frac{B}{\sqrt{h(0)}} \frac{c^2 \left(\frac{df_s^*}{dz} \Big|_{z=0} \right)}{2\omega_s \int_{-a}^0 |f_s|^2 dz}. \quad (16)$$

Здесь $B/\sqrt{h(0)}$ — амплитуда внешней волны, заданная снаружи от резонатора в опорном сечении $z = 0$. Способ нахождения этого сечения описан в Приложении 1. Пользуясь формулами (10), (11), (15) и сопоставляя (14) и (16), получим выражение (4).

Работа поддержана фондом РФФИ, грант № 06-02-16272.

Литература

1. Батанов Г. М., Колик Л. В., Новожилова Ю. В. и др. Реакция гиротрона на слабое отражение волн от плазмы, промодулированное низкочастотными колебаниями//ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 5. С. 90—95.
2. Fernandez A., Kharchev T. et al. Gyrotron Radiation Affected by a Controlled Modulated Reflector: High Power Experiment//Int. J. of Infrared and Millimeter Waves. 2007. V. 28. No. 9. P. 705—711.
3. Ланда П. С. и др. Стохастические колебания в генераторе с дополнительной обратной связью//Радиотехника и электроника. 1986. Т. 31. № 4. С. 730—733.
4. Novozhilova Yu. V., Petelin M. I., Sergeev A. S. Parametric Instability of Autooscillator Connected with Remote Load. Abstracts of VII Int. Workshop "Strong Microwaves: Sources and Applications". — Nizhny Novgorod, 2008. P. 54.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. — М.: Физматлит, 2003. — 656 с.
6. Ковалев Н. Ф., Новожилова Ю. В., Петелин М. И.// Диффузионная связь бочкообразного резонатора с соосным волноводом//Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 2007. Т. 10—11. С. 884, 885.
7. Рабинович М. И., Трубецков Д. И. Введение в теорию колебаний и волн. — М.: Наука, 1984.
8. Ланда П. С. Автоколебания в системах с конечным числом степеней свободы. — М.: Наука, 1980.
9. Novozhilova Yu. V., Fernandez A., Martin R., Petelin M. I. Gyrotron phase locked by resonant load: theory. Proc. Of the Int. Workshop "Strong Microwaves in plasmas". — Nizhny Novgorod, 2006. V. 1. P. 173—178.
10. Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю.//Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. — М.: Техносфера, 2003.
11. Каценеленбаум Б. З. Теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися параметрами. — М.: АН СССР, 1961.
12. Власов С. Н., Жислин Г. М., Орлова И. М., Петелин М. И., Рогачева Г. Г. Открытые резонаторы в виде волноводов переменного сечения//Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1969. Т. 12. № 8. С. 1236—1244.

Статья поступила в редакцию 13 апреля 2009 г.

Gyrotron reaction on small reflection from nonstationary load

N. K. Kharchev, G. M. Batanov, Yu. F. Bondar, K. A. Sarkisian

Institute of Prokhorov General Physics RAS, 38 Vavilov str., 191991, Moscow, Russia

E-mail: khar@fpl.gpi.ru

A. Fernandez, A. V. Tolkachev

EURATOM-CIEMAT, 22 Complutense av., 280040, Madrid, Spain

E-mail: angela.curto@ciemat.es
Yu. V. Novozhilova, M. I. Petelin
Applied Physics Institute of RAS, 46 Ulyanov str., 603950, Nizhniy Novgorod, Russia
E-mail: river@appl.cki-nnov.ru

We have studied interaction of a gyrotron with a remote low-reflection oscillating membrane. After the ending of transient processes, which character and duration depend on the sequence of gyrotron and acoustic modulator switching on, the power turns modulated at the frequency of the load oscillations. When the membrane shifts along the wave ray at a half wavelength, the scenario of generator-load interaction is reproduced.

PACS: 07.50.-e

Keywords: gyrotron, non-stationary loading, acoustic modulator, length of a wave.

Харчев Николай Константинович, науч. сотр.
119991, Москва, ул. Вавилова, 38, ИОФ РАН
Тел. 8-499-1358039, факс. 8-499-1358011, E-mail: khar@fpl.gpi.ru
Фернандез Ангела, начальник отдела
Толкачёв Александр Валентинович, инженер
280040, Испания, г. Мадрид, аведа Комплютенсе, 22, СИЕМАТ
Тел. 91-3466159, E-mail: angela.curto@ciemat.es
Батанов Герман Михайлович, начальник отдела
Бондарь Юрий Федорович, ведущий конструктор
Колик Леонид Викторович, науч. сотр.
Сарксян Карен Агафиевич, ведущий науч. сотр.
Новожилова Юлия Владимировна, науч. сотр.
Петелин Михаил Иванович, профессор
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46, ИПФ РАН
E-mail: river@appl.cki-nnov.ru

* * *