

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики открытых систем

Изучение взаимной синхронизации двух генераторов

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 431 группы

направления

09.03.02 «Информационные системы и технологии»

Факультета нелинейных процессов

Катышева Семена Дмитриевича

Научный руководитель
ассистент

_____ Адилова А.Б.

Зав. кафедрой физики открытых систем,
профессор, д.ф.-м.н.,

_____ Короновский А.А.

Саратов 2019 год

Введение

На данный момент одним из направлений развития электроники является генерация и усиление сигнала миллиметрового диапазона значительной мощности. Система сложения мощностей, одним из принципов которой является взаимная синхронизация сверхвысокочастотных генераторов, представляет большой интерес. Основным прибором, используемым в этих генераторах, является гиротрон. Гиротрон — электровакуумный СВЧ-генератор, источником СВЧ-излучения которого является электронный пучок, вращающийся в сильном магнитном поле.

Приборы гиротронного типа основаны на использовании индуцированного излучения. Для получения больших мощностей принципиально важно сформировать сгустки пространственного заряда и сфазировать их таким образом, чтобы они передавали энергию СВЧ полю.

В настоящее время использование мощных гиротронов, работающих в непрерывном режиме в ТГц диапазоне частот, имеет широкое применение для многочисленных приложений, в том числе для нагрева плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза ITER.

Электронно-циклотронный нагрев плазмы в установках термоядерного синтеза является одним из основных направлений применения гиротронов. Для этих целей разрабатываются комплексы из нескольких гиротронов. Например, в проекте ITER планируется использование 24 гиротронов. Они расположены в здании радиочастотного нагрева и передают свою энергию по волноводам, длина которых составляет 160 м. Важно обеспечить когерентную работу всех гиротронов. В связи с этим, задача о взаимной синхронизации гиротронов, работающих на общую нагрузку, привлекает большое внимание исследователей.

В теории автоколебательных систем обычно различают два разных типа самовозбуждения, а именно: мягкое и жесткое возбуждение. В режиме мягкого самовозбуждения неустойчивое возмущение на уровне шума возрастает и развивается в самоподдерживающееся колебание. Наоборот, в

режиме жесткого возбуждения автоколебания устанавливаются только для достаточно интенсивного начального возмущения с амплитудой, превышающей определенный порог, в то время как небольшое возмущение затухает. Феномен жесткого возбуждения является естественным для многих электронных генераторов. В частности, в гиротроне максимальная эффективность часто достигается в режиме жесткого возбуждения. Поэтому вопросы исследования синхронизации в системах с жестким возбуждением являются актуальными.

В данной работе проводится моделирование синхронизации двух связанных генераторов. При этом принципиальную роль играет запаздывание, которое обусловлено конечным временем распространения сигнала от одного гиротрона к другому.

Выпускная квалификационная работа состоит из 3 глав:

1. Гиротрон: устройство и принцип работы
2. Исследование синхронизации в системе двух связанных генераторов в режиме мягкого самовозбуждения
3. Исследование системы двух связанных генераторов с жестким возбуждением

В главе 1 представлено устройство и принцип работы гиротрона. В главе 2 приведено исследование синхронизации в системе двух связанных генераторов в режиме мягкого самовозбуждения. Рассматривается модель связанных гиротронов с задержкой связи, приведены результаты численного моделирования, проанализировано условие возникновения синхронизации на плоскости параметров Δ, ρ . В 3 главе представлены результаты численного моделирования системы в режиме жесткого возбуждения для двух гиротронов с фиксированной гауссовой структурой ВЧ поля.

Глава 1. В первой главе выпускной квалификационной работы рассмотрим принцип работы и устройство гиротрона. Принцип работы связан с основным релятивистским эффектом - зависимостью массы электронов от скорости. Приборы гиротронного типа основаны на использовании индуцированного излучения. Для получения больших мощностей принципиально важно сформировать сгустки пространственного заряда и сфазировать их таким образом, чтобы они передавали энергию СВЧ полю. Благодаря этому в гиротронах реализуется индуцированное циклотронное излучение - излучение на циклотронной частоте ω_H или на ее гармониках, связанное с вращением электронов в магнитном поле.

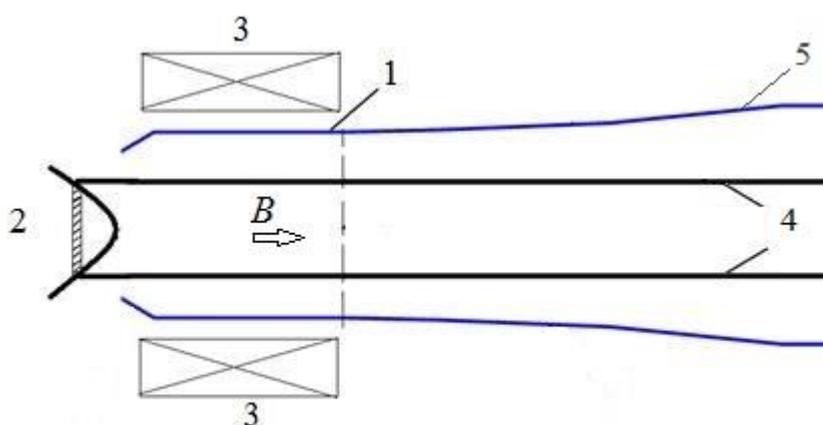


Рис. 1 Схема гиротрона: 1 – резонатор; 2 – катод; 3 – соленоид; 4 – электронный пучок; 5 – коллектор.

Электрон, вылетевший из катода, движется в неоднородных скрещенных статических электрическом и магнитном полях, приобретая на входе в резонатор продольную скорость и циклотронное вращение. Пушка находится в относительно слабом поле рассеивания соленоида. Благодаря этому возрастает начальная вращательная энергия, приобретенная электронами в пушке, кроме того, по мере движения электронов в более сильное магнитное поле идет перекачка энергии продольного движения в энергию вращения.

Электронные пучки в гиротроне принято называть поливинтовыми. Каждый электрон в пучке, двигаясь по винтовой траектории, вращается вокруг силовой линии магнитного поля с циклотронной частотой

$$\omega_H = \frac{eB}{m} = \frac{eB}{m_0\gamma} = \frac{eB\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}}{m_0},$$

где V – полная его скорость. Радиус трубки тока равен:

$$R = \frac{mV_{\perp}}{eB} = \frac{m_0V_{\perp}}{eB} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{V}{c}\right)^2}}$$

где $\gamma = (\sqrt{1-\beta^2})^{-1}$, $\beta = \frac{V}{c}$

На рис.2 показан механизм группировки электронов в данном устройстве и фазировки электронных сгустков в тормозящих фазах СВЧ поля:

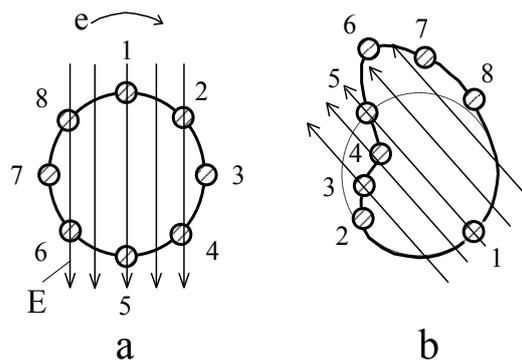


Рис. 2 Механизм группировки электронов в данном устройстве и фазировки электронных сгустков в тормозящих фазах СВЧ поля

Электроны 1 и 5, которые движутся перпендикулярно электрическому полю, не изменяют своей линейной скорости, а также скорости углового движения.

Электроны 2, 3, 4, которые движутся вдоль электрического поля, подвергаются торможению полем, т.е. их поперечная скорость V_{\perp} будет уменьшаться и это означает, что электроны начнут двигаться с большей угловой скоростью. Эти электроны в своем движении догоняют электрон 5, так как его скорость не изменилась. При этом радиус их траектории уменьшается.

Электроны 6, 7, 8, движущиеся навстречу полю E , будут увеличивать свою поперечную скорость и поэтому начнут двигаться по большему радиусу, но уже с меньшей угловой скоростью. Поэтому они также будут приближаться к электрону 5.

Таким образом, получается, что под действием ВЧ поля будет происходить формирование сгустка электронов в области электрона 5. Плотность сгустка увеличится в связи с его движением вдоль резонатора.

Глава 2. Во второй главе выпускной квалификационной работы проведено исследование синхронизации в системе двух связанных генераторов в режиме мягкого самовозбуждения. Рассматриваемая схема двух гиротронов, связанных частичным отражением от удаленной общей нагрузки, показана на рис. 3.

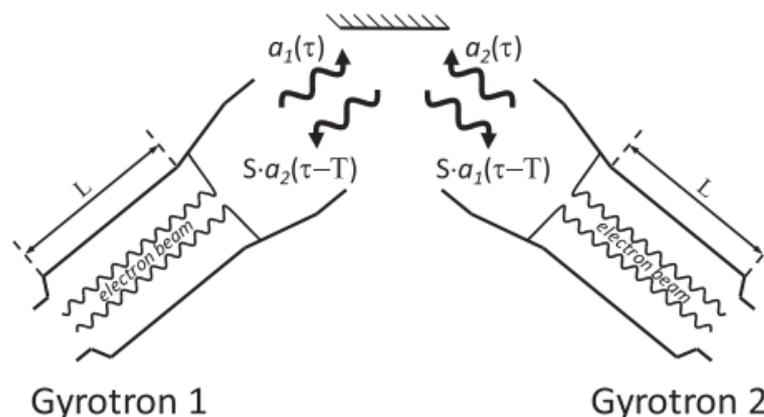


Рис. 3. Схема двух гиротронов, связанных частичным отражением от удаленной общей нагрузки

В данной работе рассматриваются различные подходы к моделированию двух гиротронов. Первый подход основан на хорошо известной модели гиротрона с фиксированной гауссовой структурой ВЧ

поля. Для этой модели уравнение движения записывается следующим образом:

$$\frac{dp}{d\zeta} + i(\Delta_H + |p|^2 - 1)p = iAf_s(\zeta),$$

где $p(\zeta = 0) = \exp(i\varphi_0)$, $\varphi_0 \in [0; 2\pi)$ – граничные условия.

В правой части стоит функция f_s , которая определяет пространственную структуру поля, A – безразмерная медленно меняющаяся амплитуда поля, которая определяется из уравнения возбуждения, где I_s – безразмерный параметр тока, J – гармоника тока. Эту систему можно моделировать только численно.

p – безразмерный поперечный импульс;

$\Delta_H = \frac{2}{\beta_{\perp}^2} \left(1 - \frac{\omega_H}{\omega_0}\right)$ – расстройка от циклотронного резонанса;

$\zeta = \frac{\beta_{\perp}^2 \omega_0 z}{\beta_{\parallel} c}$ – безразмерная продольная координата

Уравнение возбуждения:

$$\frac{dA}{d\tau} + A = iI_s \int_0^{\zeta_k} J(\zeta, \tau) f_s^*(\zeta) d\zeta$$

$\tau = \omega_0 t / 2Q$ – безразмерное время;

I_s – нормированный параметр тока

$f_s(\zeta) = \exp\left[-3\left(\frac{2\zeta}{\zeta_k} - 1\right)^2\right]$ – гауссово распределение поля в резонаторе

$J = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p d\varphi_0$ – гармоника тока

Взаимная синхронизация – фундаментальное явление, наблюдаемое в системе связанных генераторов. Задержка сигнала связи существенно влияет на синхронизацию в системе взаимодействующих СВЧ-генераторов,

поскольку расстояние между элементами системы велико по сравнению с длиной волны. Динамические системы с задержкой по времени бесконечномерны и поэтому могут демонстрировать очень сложное поведение, то есть когда время задержки достаточно велико, появляются моды синхронизации более высокого порядка, что присуще бесконечномерным динамическим системам с задержкой по времени.

На рис. 4 построены области синхронизации на плоскости параметров «коэффициент связи ρ - расстройка частот Δ ». Из рисунка видно, что при наличии запаздывания появляется несколько режимов синхронизации. Возможна синхронизация как на синфазной моде, так и на противофазной.

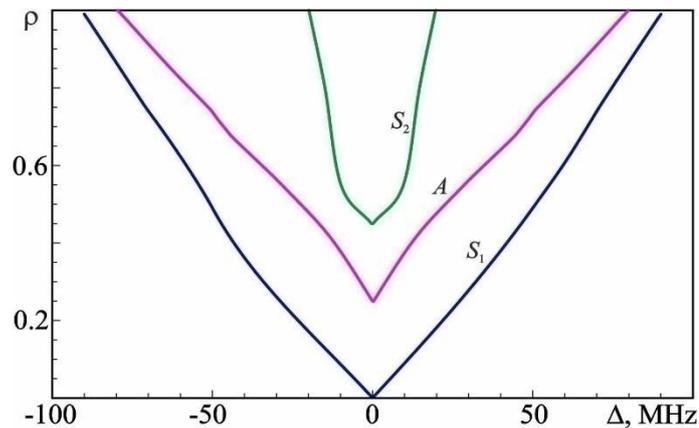


Рис. 4 Области синхронизации на плоскости параметров (Δ, ρ) , полученные в результате численного моделирования при $\psi=0.4\pi$, $\tau=5$.

Глава 3. В третьей главе выпускной квалификационной работы было проведено исследование системы двух связанных генераторов с жестким возбуждением. Была исследована синхронизация гиротрона в режиме жесткого возбуждения. В процессе исследования был обнаружен ряд отличий от хорошо изученной картины синхронизации генератора с мягким возбуждением. Если амплитуда начального возмущения достаточно велика, то будет устанавливаться режим синхронизации с высоким КПД. Более того, при определенных значениях параметров, режим синхронизации оказывается чрезвычайно чувствительным к начальной фазе колебаний.

На рис. 5 приведена зависимость КПД от времени. Коэффициент связи выбран достаточно большим. Оба гиротрона начинают работу с одинаковых начальных амплитуд. Как видно из рисунка, вначале происходит возбуждение колебаний в обеих подсистемах, КПД достигает максимального значения. Но уже при $t > \tau$ сигнал из одного гиротрона начинает поступать в другой. И в результате происходит полное подавление колебаний обоих гиротронов. Если взять несколько различные начальные условия, то происходит подавление колебаний только одного из гиротронов.

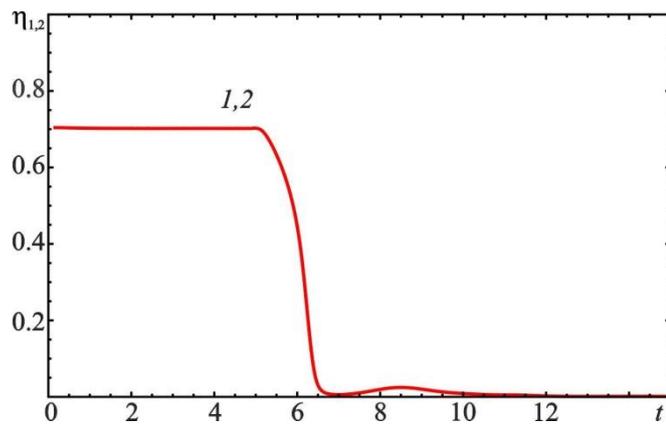


Рис. 5. Зависимость КПД первого и второго гиротрона от времени при $\Delta_H=0.53$, $I_s=0.06$, $\rho=0.5$, $\psi=0.15\pi$, $\tau=5$.

В то же время, взаимная связь между гиротронами может, напротив, приводить к возбуждению одного гиротрона другим. Например, на рис. 6 приведены зависимости КПД для первого (кривая 1) и второго (кривая 2) гиротронов, когда начальная амплитуда второго гиротрона равна нулю.

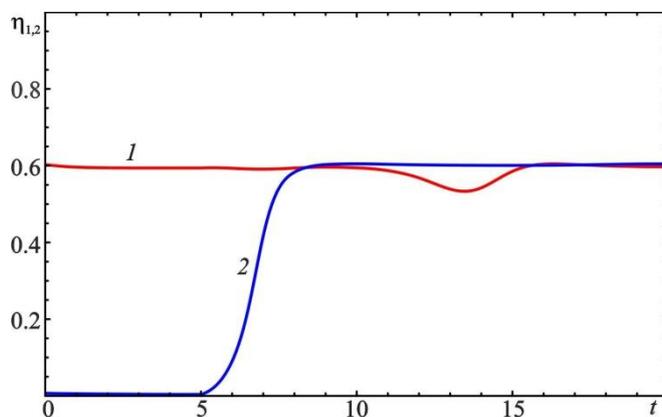


Рис. 6. Зависимость КПД первого и второго гиротрона от времени при $\rho=0.3$, $\psi=0.4\pi$.

Остальные параметры те же, что и на рис. 4

В режиме жесткого возбуждения нулевое решение является устойчивым, поэтому колебания во втором гиротроне вначале не нарастают. Однако когда сигнал от первого гиротрона поступает в резонатор второго, он начинает возбуждать колебания в нем, в результате чего устанавливается режим взаимной синхронизации.

Заключение

В работе было рассмотрено устройство и принцип работы гиротрона, была исследована теория синхронизации гиротрона в режиме жесткого возбуждения и при определенных значениях параметров режим синхронизации оказывается чрезвычайно чувствительным к начальной фазе колебаний.

В работе проведено численное моделирование при различных параметрах. Найдены условия возникновения синхронизации на синфазной и противофазной моде.

Таким образом, в работе показано, что запаздывающий характер связи определяет картину синхронизации гиротронов. Более того, при больших временах запаздывания число возможных режимов синхронизации увеличивается.

Список литературы

- [1] K. Sakamoto, "Progress of high-power-gyrotron development for fusion research," *Fusion Sci. &Tech*, vol. 52, p. 145-153, 2007.
- [2] R.M. Rozental, N.S. Ginzburg, M.Yu. Glyavin, A.S. Sergeev, and I.V. Zotova, "Mutual synchronization of weakly coupled gyrotrons," *Phys. Plasmas*, vol. 22, p. 093118, 2015.
- [3] G.S. Nusinovich, "Introduction to the Physics of Gyrotrons," Baltimore, London: The Johns Hopkins University Press, 2004.
- [4] A.B. Adilova, S.A. Gerasimova, and N.M. Ryskin, "Synchronization of delay-coupled gyrotron oscillators," *EPJ Web of Conferences*, vol. 149, 04029, 2017. DOI: 10.1051/epjconf/201714904029.
- [5] K.A. Yakunina, A.P. Kuznetsov, and N.M. Ryskin, "Injection locking of an electronic maser in the hard excitation mode," *Phys. Plasmas*, vol. 22, no. 11, 113107, Nov. 2015.