

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

Кафедра физики открытых систем

**Численное моделирование синхронизации автогенератора с жестким  
возбуждением внешним гармоническим сигналом**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 431 группы

направления 09.03.02 Информационные системы и технологии

Факультета нелинейных процессов

---

Ефимова Дмитрия Николаевича

---

Научный руководитель  
ассистент

А.Б.Адилова

подпись, дата

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

А.А.Короновский

подпись, дата

Саратов 2019 г.

## Введение

Терагерцовый диапазон частот стал очень привлекательным для многих новых исследований и технологических применений, что стимулирует поиск эффективных способов генерации мощного когерентного терагерцового излучения. Среди существующих источников субтерагерцового и терагерцового излучения важная роль принадлежит таким хорошо известным и достаточно эффективным электронным устройствам, как генераторы обратной волны, лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) и гиротроны. Субтерагерцовые и терагерцовые БВО, разработанные много лет назад, работают при низкой энергии электронов до 5 кэВ и обеспечивают относительно низкую излучаемую мощность порядка нескольких милливатт на максимальной частоте 1,4 ТГц. Терагерцовым ЛСЭ нужны электронные пучки с очень высокой энергией порядка 2–12 МэВ; соответствующие крупные установки обеспечивают высокие пиковые и средние мощности излучения порядка  $\sim 10^3$ – $10^6$  и  $\sim 10^2$ – $10^3$  Вт соответственно на частотах до 1,8 ТГц и даже выше. ЛСЭ могут обеспечивать когерентное и плавно настроенное по частоте излучение не только во всей области частот ТГц, но также и в областях гораздо более высоких частот, предположительно вплоть до рентгеновских лучей. В отличие от гиротронов, ЛСЭ могут генерировать чрезвычайно короткие (пикосекундные) импульсы с широким спектром, что выглядит перспективным для некоторых применений. Однако ЛСЭ обычно требуют ускорителей частиц большого размера для их реализации. Именно поэтому существующие ЛСЭ могут использоваться только в специализированных исследовательских центрах. По сравнению с ЛСЭ субтерагерцовые и терагерцовые гиротроны способны генерировать одинаковый или даже более высокий уровень средней мощности, используя значительно меньшую энергию электронов, составляющую десятки кэВ. В то же время терагерцевые гиротроны требуют очень сильных магнитных полей. Например, для получения частоты 1 ТГц при фундаментальном

циклотронном резонансе требуется более 36 Тл. В настоящее время такие поля можно создавать в основном в импульсных соленоидах. Однако высокочастотное излучение также может быть эффективно получено в гиротронах, работающих на высоких циклотронных гармониках  $s = 2, 3$ , требующих в два или три раза меньшего магнитного поля. Важно, что необходимые магнитные поля могут быть обеспечены современными криомагнитами. Еще одна, активно развивающаяся область применения гиротронов связана с их использованием для задач спектроскопии и диагностики различных сред, создания систем связи и мониторинга окружающей среды. Высокочастотные гиротроны востребованы рядом современных научных направлений, нуждающихся в источниках субмиллиметрового излучения вплоть до терагерцового диапазона частот. Терагерцовые волны сочетают в себе свойства своих "соседей". Они, как радиоволны, обладают большой проникающей способностью, и, в то же время, излучение этого диапазона легко фокусируется, подобно инфракрасному излучению. Терагерцовое излучение может найти широкое применение в системах радиовидения, например, для распознавания взрывчатых веществ.

В данной выпускной квалификационной работе бакалавра было проведено исследование гиротронов, влияние внешнего сигнала на гиротрон. Численное моделирование проводилось методом Рунге-Кутты 4-ого порядка и методом частиц в ячейках.

Выпускная квалификационная работа состоит из 3 глав:

1. Численное моделирование осциллятора Ван-дер-Поля под внешним периодическим сигналом.
2. Гиротрон. Принцип действия и основные уравнения.
3. Влияние внешнего гармонического воздействия на режимы гиротрона.

**Глава 1.** В первой главе выпускной квалификационной работы было исследовано влияние внешнего периодического сигнала на осциллятор Ван-дер-Поля. Простейшая модель автоколебательной системы с двумерным фазовым пространством описывается уравнением Ван-дер-Поля.

$$\ddot{x} - (\lambda - x^2)\dot{x} + x = 0 \quad (1)$$

Добавим в это уравнение внешнее периодическое воздействие, дописав дополнительный член, зависящий от времени по гармоническому закону:

$$\ddot{x} - (\lambda - x^2)\dot{x} + x = \varepsilon \sin(\omega t) \quad (2)$$

Здесь параметр  $\varepsilon$  определяет безразмерную амплитуду, а  $\omega$  – частоту воздействия, отнесенную к частоте малых собственных колебаний осциллятора.

Это стандартный вид двумерной автономной динамической системы. При этом фазовое пространство  $(x, \dot{x}, t)$  образовано координатой осциллятора и его скоростью, а также третьей переменной, в качестве которой выступает время.

Для исследования системы (21), (22) введем действительные амплитуду  $R(\tau)$  и фазу осциллятора  $\varphi(\tau)$  в соответствии с

$$z(\tau) = R(\tau)e^{i\varphi(\tau)}. \quad (3)$$

Подставим (23) в комплексное укороченное уравнение (24), умножим на  $e^{-i\varphi}$  и отделим действительную и мнимую части. Тогда получаем уравнения, описывающие динамику амплитуды и фазы:

$$\begin{aligned} \dot{R} &= R - R^3 - \varepsilon \cos \varphi, \\ \dot{\varphi} &= -\Delta + \frac{\varepsilon}{R} \sin \varphi. \end{aligned} \quad (4)$$

Проведем численное моделирование системы (4) методом Рунге-Кутты 4-го порядка.

Была получена область синхронизации на плоскости частотная расстройка  $\Delta$  – амплитуда внешнего сигнала  $\varepsilon$ .

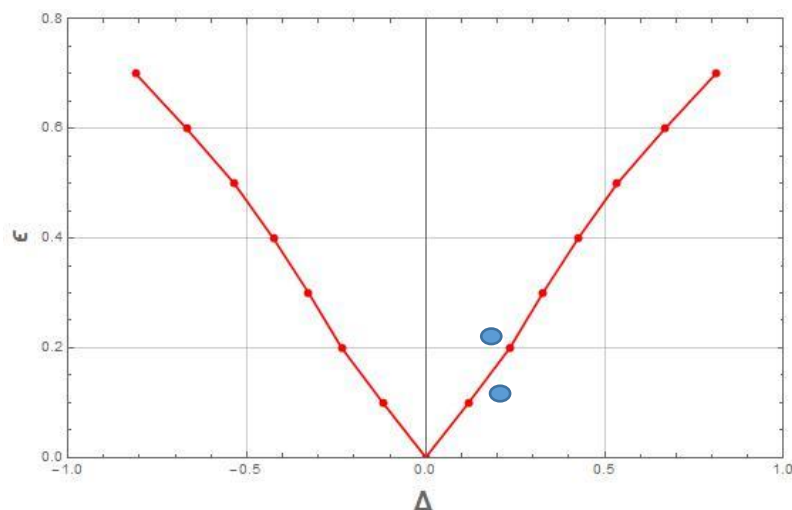


Рис. 1. Область синхронизации на плоскости параметров  $(\Delta, \varepsilon)$

На рис. 1 показаны области, где реализуется режимы захвата (рис. 2а) и биений (рис. 2б), плоскости параметров  $(\Delta, \varepsilon)$ . Критическая ситуация имеет место на граничных линиях (красная линия). Область захвата фазы имеет вид характерного языка, погруженного в область квазипериодических колебаний. Она имеет специальное название – язык Арнольда.

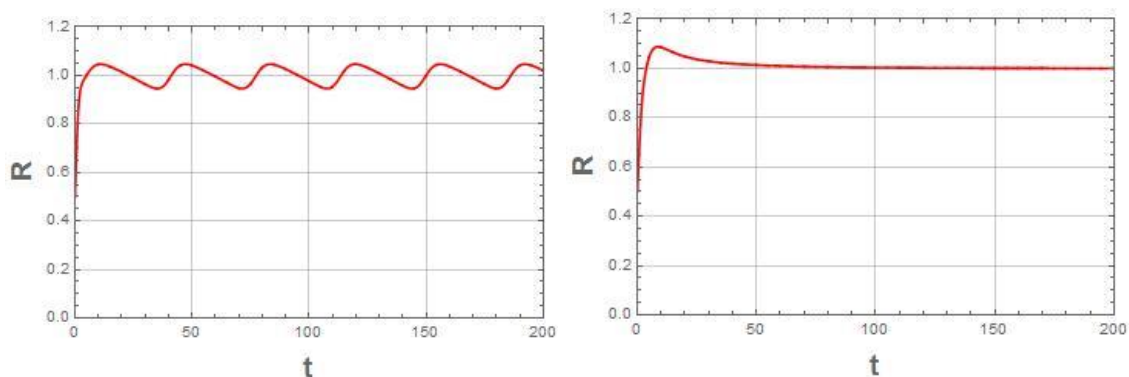


Рис. 2. Временные реализации при  $\Delta=0.2, \varepsilon=0.2$ : режим биений (а),  $\varepsilon=0.2$ : режим синхронизации

**Глава 2.** Во второй главе выпускной квалификационной работы был исследован гиротрон, принцип действия, устройство этого прибора. А также было проведено численное моделирование гиротрона.

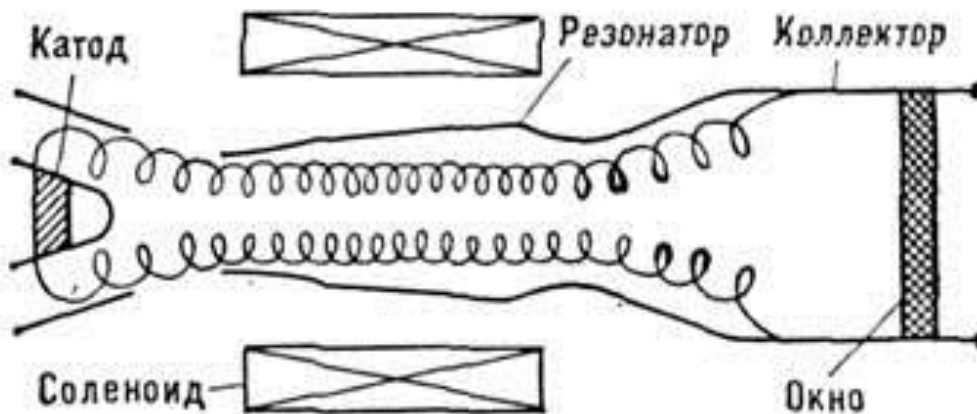


Рис. 3. Устройство гиротрона

Гиротрон — электровакуумный СВЧ-генератор. Источником СВЧ-излучения является электронный пучок, вращающийся в сильном магнитном поле. Излучение возникает на частоте, равной циклотронной, в резонаторе с критической частотой, близкой к генерируемой. Существует несколько подходов к моделированию гиротрона. Первый подход основан на хорошо известной модели гиротрона с фиксированной гауссовой структурой ВЧ поля. Ниже приведены основные уравнения которые использовались в работе.

Уравнение движения для гиротрона с фиксированной структурой поля и граничные условия:

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

$$p(\zeta = 0) = \exp(i\varphi_0), \varphi_0 \in [0; 2\pi) \quad (5)$$

В правой части уравнения стоит функция  $f_s$ , которая определяет пространственную структуру поля,  $A$  – безразмерная медленно меняющаяся амплитуда поля, которая определяется из уравнения возбуждения

$$\frac{(dA_s)}{d\tau} + \left( \frac{Q_0 A_s}{Q_s} \right) = iI_s \int_0^\mu f_s^*(\zeta) \left\langle \langle p \rangle_{\varphi_0} \exp(-i\varphi_s) \right\rangle_\psi d\zeta \quad (6)$$

где  $I_s$  – безразмерный параметр тока,  $J$  – гармоника тока. Данная модель учитывает несколько мод в гиротроне. Эта система моделируется только численно. Рассмотрим двухмодовую модель гиротрона, где индекс  $s=1$  соответствует рабочей моде. Для простоты будем считать, что добротности и параметры тока для обеих мод примерно одинаковы. Как известно, в такой модели возможна мультистабильность, т.е. в зависимости от значения начальных амплитуд мод, колебания могут возникать как на рабочей, так и на паразитной модах. Зоны генерации для этого случая приведены на (рис.4.); при этом выбрано значение  $\Delta_S = 0.2$ , где  $\Delta_S$  – это разность частот основной и паразитной моды. Эти значения примерно соответствуют параметрам гиротрона для управляемого термоядерного синтеза (УТС), который используется в проекте ITER [1].

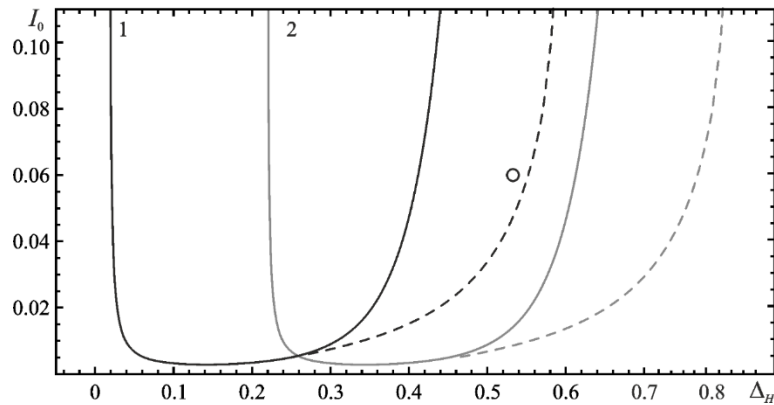


Рис. 4. Зоны генерации основной (1) и паразитной (2) мод для двухмодовой модели гиротрона на плоскости параметров циклотронная расстройка — безразмерный параметр тока.

Выберем значения параметров  $I_s = 0.06$ ,  $\Delta_H = 0.53$ ,  $\mu = 15$ , что соответствует максимальному значению КПД  $\eta \approx 0.7$  для рабочей моды. Соответствующая точка отмечена на (рис.4) светлым кружком. Видно, что в

этом случае основная мода находится в режиме жесткого возбуждения, а паразитная в мягком возбуждении. Также после численного решения в программе уравнения возбуждения (6) и уравнения движения (5) был построен фазовый портрет.

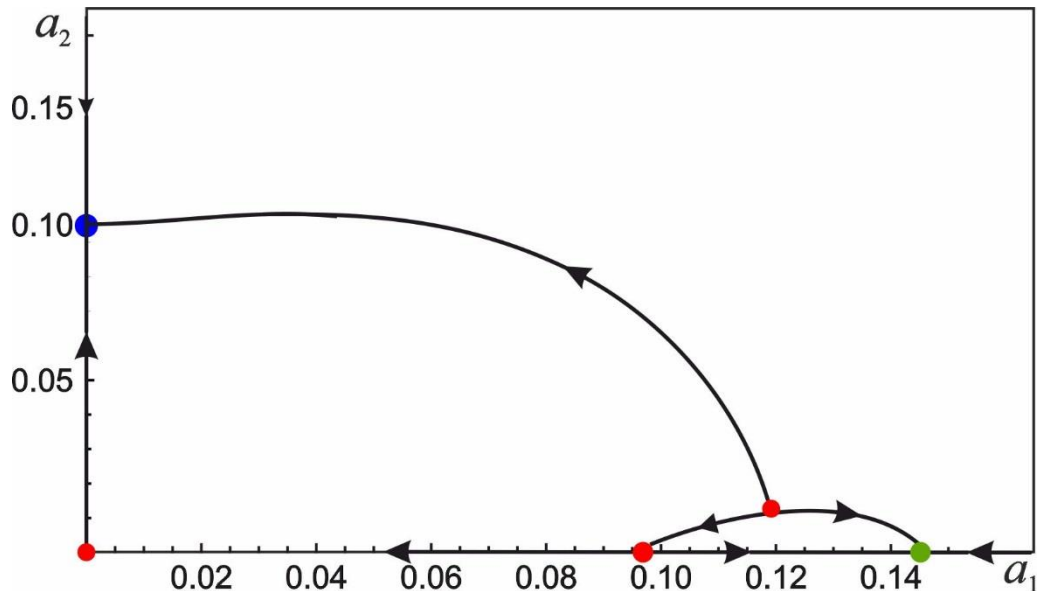


Рис. 5. Фазовый портрет для параметров, указанных светлым кружком на рис.4.

На фазовом портрете по оси абсцисс отложена амплитуда основной моды, на ось ординат отложена амплитуда паразитной моды. Зеленой точкой показывается режим основной моды, синяя точка – устойчивое решение паразитной моды. Видно, что эти решения являются устойчивыми. Бассейн притяжения основной моды не очень большой по сравнению с бассейном притяжения паразитной моды, и точка на портрете отмеченная красным, разграничивает два этих бассейна. Пронаблюдаем тоже самое на временных реализациях.

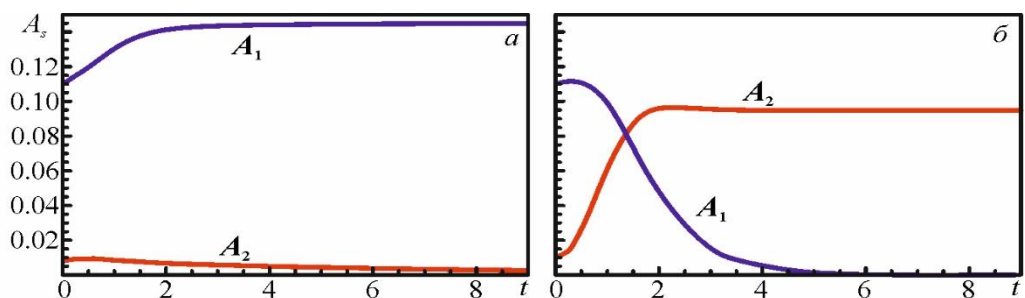


Рис. 6. Временные зависимости амплитуд основной и паразитной мод от времени



При значениях паразитной моды  $A_2 \approx 0.015$  и  $A_1 \approx 0.16$  основной моды, то видно на первом рисунке, что паразитная мода не возбуждается, устанавливается режим основной моды. Если взять значения  $A_2 \approx 0.09$  и  $A_1 \approx 0.16$ , то видно что колебания паразитной моды устанавливаются, поскольку паразитная мода на зонах генерации находится в режиме мягкого возбуждения, т.е. достаточно малых флуктуаций для установления режима на паразитной моды. Поэтому колебания на паразитной моде возбуждаются, а на основной затухают.

**Глава 3.** В третьей главе моей выпускной квалификационной работы будет описано воздействие внешнего сигнала на гиротрон. В случае воздействия внешнего гармонического сигнала уравнения возбуждения переписутся в виде:

$$\frac{(dA_1)}{d\tau} + A_1 = iI_s \int_0^\mu f_s(\zeta) \langle \langle p \rangle_{\varphi 0} \exp(-i\psi_s) \rangle_\psi d\zeta + 2f \exp(i\Omega\tau)$$

$$\frac{(dA_2)}{d\tau} + A_2 = iI_s \int_0^\mu f_s(\zeta) \langle \langle p \rangle_{\varphi 0} \exp(-i\psi_s) \rangle_\psi d\zeta$$

Здесь  $f$  и  $\Omega$  – амплитуда и частота внешнего сигнала,  $s = 0,1$  – номер соответствующей моды. То есть, воздействие внешним сигналом происходит только на основную моду. Рассмотрим фазовый портрет, представленный на рис.7.

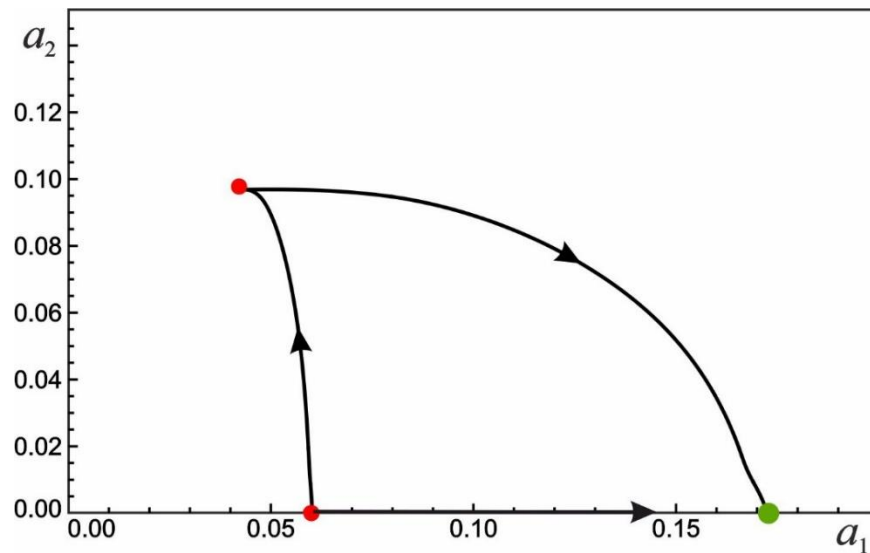


Рис. 7. Фазовый портрет для параметров, указанных на рис.4. светлым кружком

На фазовом портрете (Рис.7) видно, что бассейн притяжения основной моды увеличился, а точка изображенная на фазовом портрете (красная верхняя) – это точка мультистабильности.

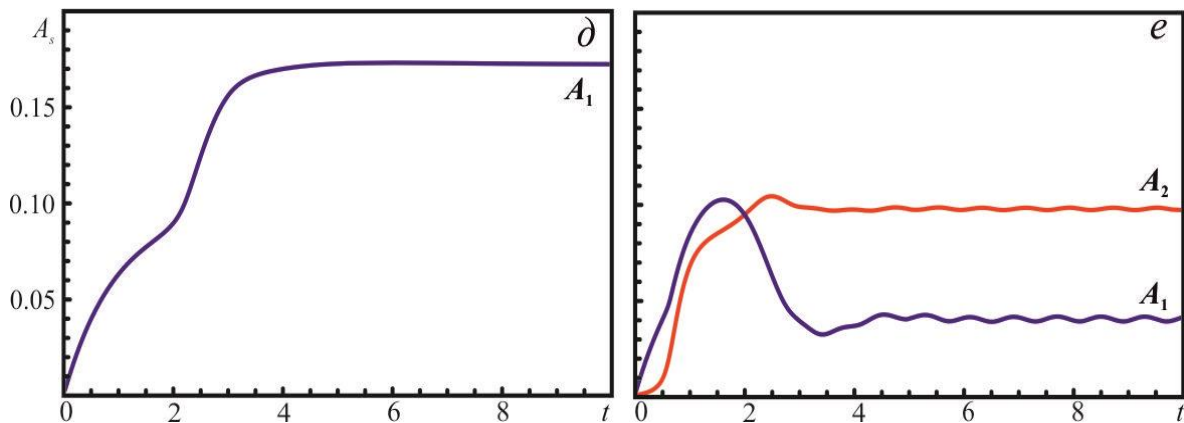


Рис.8. Временные зависимости амплитуд основной и паразитной мод от времени

На рисунке 8.е, в можно увидеть, как в системе устанавливаются колебания как на паразитной, так и на основной моде.

## Переключение между модами.

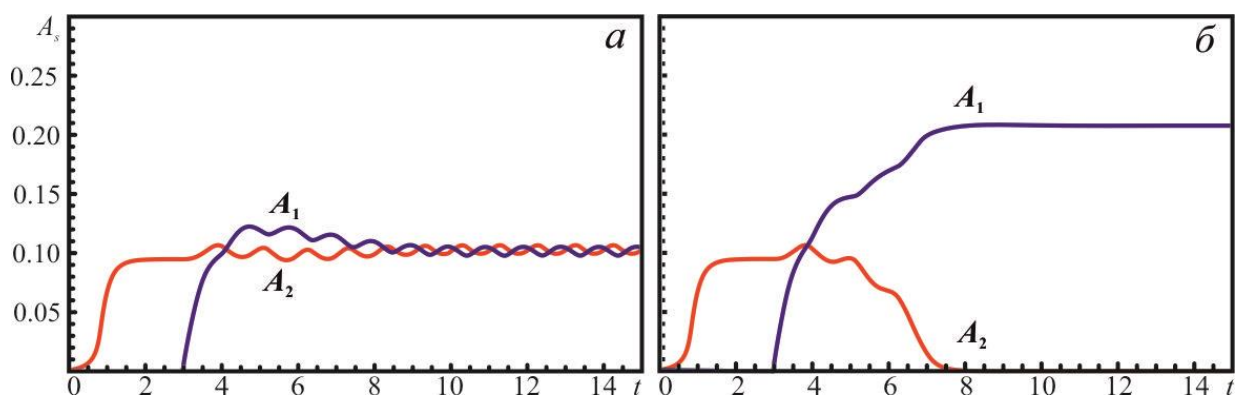


Рис.9. Временные зависимости амплитуд основной и паразитной мод от времени

На данной временной реализации можно пронаблюдать процесс переключения между модами. Если взять маленькие значения паразитной моды и подождать пока колебания на этой моде установятся, потом подать небольшой внешний сигнал, то установятся колебания и на паразитной и на основной моде. Здесь мы можем наблюдать трехчастотный режим: частота основной моды, частота биений, частота паразитной моды

Вновь запуская с очень маленьких начальных условий, колебания на паразитной моде возбуждятся, а на основной моде нет. Взяв внешний сигнал большего значения, можно увидеть, как колебания на основной моде установились, а колебания на паразитной затухли, далее если убрать внешний сигнал на основной моде и подействовать им на паразитную, то картина будет аналогичной, только на этот раз колебания на паразитной моде установятся, а на основной затухнут. Таким образом, влияя внешним сигналом на гиротрон, можно переключаться между модами.

## Заключение

Перечислим основные результаты, полученные в ходе выполнения выпускной квалификационной работы.

Была рассмотрена двухмодовая квазилинейная математическая модель гиротрона, описывающая режимы как мягкого, так и жесткого возбуждения. Система характеризуется двумя управляющими параметрами возбуждения. В зависимости от параметров возбуждения в системе могут наблюдаться следующие режимы: отсутствие автоколебаний, что соответствует устойчивому нулевому решению, устойчивые одномодовые режимы автоколебаний для первой и второй моды, двухмодовые автоколебания. В зависимости от параметров, возбуждение каждой из мод может происходить либо мягким, либо жестким образом. Построены фазовые портреты, которые иллюстрируют бифуркации, происходящие при различных сценариях включения.

Было проведено численное моделирование гиротрона с гауссовой структурой ВЧ поля. Были построены зоны генерации и фазовый портрет для случая максимального КПД. Получилось значительно увеличить бассейн притяжения основной моды, оказывая влияние внешним сигналом. Также удалось исследовать явление переключения между модами, используя внешний сигнал.

## Список литературы

1. Глявин М.Ю., Денисов Г.Г., Кулыгин М.Л., Мельникова М.М., Новожилова Ю.В., Рыскин Н.М. Стабилизация частоты гиротрона слабой отражённой волной // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 9. С. 747-758
2. Nusinovich G.S., Thumm M.K.A., Petelin M.I. The gyrotron at 50: historical overview // J. Infr. Millim. Terahertz Waves. 2014. Vol. 35, No. 4. P. 325– 381.
3. Idehara T., Saito T., Ogawa I., Mitsudo S., Tatematsu Y., Sabchevski S. The potential of the gyrotrons for development of the sub-terahertz and the terahertz frequency range. A review of novel and prospective applications // Thin Solid Films. 2008. No. 517. P. 1503–1506.
4. Bykov Yu., Ereemeev A., Glyavin M., Kholoptsev V., Luchinin A., Plotnikov I., Denisov G., Bogdashev A., Kalynova G., Semenov V., Zharova N. 24–84GHz gyrotron systems for technological microwave applications // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. Vol. 32, No. 1. P. 67-72.
5. Nusinovich G.S. Review of the theory of mode interaction in gyrodevices // IEEE Trans. Plasma Sci. 1999. Vol. 27, No. 2. P. 313-326.
6. Бакунин В.Л., Денисов Г.Г., Новожилова Ю.В. Зоны захвата частоты многомодового гиротрона мегаваттного уровня мощности внешним сигналом // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 12. С. 999-1011.
7. Моисеев М.А., Нусинович Г.С. К теории многомодовой генерации в гиромонотроне // Изв. вузов. Радиофизика. 1974. Т. 17, № 11. С. 1709-1717.
8. Мельникова Г.Н., Таранович Т.М. Конкуренция мод и режимы захвата автогенератора // Изв. вузов. Радиофизика. 1976. Т.19, № 8. С. 11561161.

9. The Gyrotron V. A. FLYAGIN, A. V. GAPONOV, M. I. PETELIN, AND V. K. YULPATOV IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. MTT-25, NO. 6, JUNE 1977
10. J Infrared Milli Terahz Waves (2011) 32:371–379 DOI 10.1007/s10762-010-9689-x
11. IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 32, NO. 3, JUNE 2004 Startup Scenarios in High-Power Gyrotrons Gregory S. Nusinovich, Fellow, IEEE, Oleksandr V. Sinitsyn, Leonid Velikovich, Muralidhar Yeddulla, Thomas M. Antonsen, Jr., Senior Member, IEEE, Alexander N. Vlasov, Senior Member, IEEE, Stephen R. Cauffman, Member, IEEE, and Kevin Felch, Member, IEEE