

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

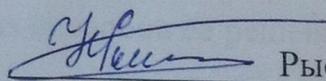
Кафедра нелинейной физики

**СИНХРОНИЗАЦИЯ ДВУХМОДОВОГО ЭЛЕКТРОННОГО МАЗЕРА С  
ЖЕСТКИМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ**

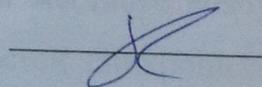
АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 4 курса 411 группы  
направления 03.03.01 «Прикладные математика и физика»  
Факультета нелинейных процессов  
Преображенской Наталии Вадимовны

Научный руководитель  
д.ф.-м.н., профессор

 Рыскин Н.М.

Зав. кафедрой нелинейной физики,  
к.ф.-м.н., доцент

 Бегинин Е.Н.

Саратов 2018 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра нелинейной физики

**СИНХРОНИЗАЦИЯ ДВУХМОДОВОГО ЭЛЕКТРОННОГО МАЗЕРА С  
ЖЕСТКИМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 4 курса 411 группы  
направления 03.03.01 «Прикладные математика и физика»  
Факультета нелинейных процессов  
Преображенской Наталии Вадимовны

Научный руководитель

д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_ Рыскин Н.М.

Зав. кафедрой нелинейной физики,

к.ф.-м.н., доцент

\_\_\_\_\_ Бегинин Е.Н.

Саратов 2018 г.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одной из наиболее актуальных проблем СВЧ электроники является освоение коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового (терагерцового) диапазона. Одним из мощных источников терагерцового излучения являются мазеры на циклотронном резонансе — гиротроны [1-4].

Гиротрон представляет собой вакуумный электронный прибор, предназначенный для генерации электромагнитных колебаний большой мощности в миллиметровом и субмиллиметровом (терагерцовом) диапазонах частот. Принцип работы гиротрона основан на передаче электромагнитному полю вращательной энергии электронов, движущихся в однородном магнитостатическом поле в условиях циклотронного резонанса, т.е. поглощение энергии происходит только на частотах равных или кратных частоте вращения электронов в постоянном магнитном поле [1-4]. В настоящее время гиротрон используется в различных областях науки и техники, в том числе, для электронно-циклотронного нагрева плазмы в установках термоядерного синтеза [5], для микроволнового нагрева различных материалов [6], как источник терагерцового излучения в установках для спектроскопических измерений, для диагностики плазмы, в биомедицинских исследованиях и др. [7,8].

В современных гиротронах, как правило, используются сверхразмерные колебательные системы (поперечные размеры волновода значительно превышают длину волны, т.е. в нём возможно одновременное распространение множества мод) [1,3]. Поэтому особое значение приобретает задача обеспечения одномодовой генерации. Одним из способов ее решения является синхронизация внешним сигналом. Поскольку в гиротроне режим максимального КПД, как правило, лежит в области жесткого возбуждения [1,3], исследование фундаментальных закономерностей синхронизации систем с жестким возбуждением представляет большой интерес. Стоит отметить, что задача о синхронизации гиротронов внешним сигналом рассматривалась ра-

нее в ряде работ [9-12] и продолжает привлекать большое внимание [13-15]. Однако воздействие внешним сигналом на многомодовые автогенераторы с точки зрения нелинейной динамики изучено недостаточно. В работе [16] была развита теория синхронизации генератора с жестким возбуждением и проведено сопоставление с численным моделированием для одномодовой теории гиротрона с фиксированной гауссовой структурой ВЧ поля. Однако в [16] рассматривалось воздействие внешнего сигнала только на одномодовую модель. В связи с этим, изучение особенностей синхронизации многомодовых моделей гиротрона представляется актуальной задачей.

**Целью** данной работы является исследование влияния конкуренции двух взаимодействующих мод на картину синхронизации, описанную в [16]. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- Развитие квазилинейной двухмодовой модели электронного мазера с жестким возбуждением;
- Бифуркационный анализ и численное моделирование данной системы;
- Проверка полученных результатов при помощи численного моделирования на основе нестационарной теории гиротрона с фиксированной структурой ВЧ поля.

Выпускная квалификационная работа содержит 49 страниц текста и состоит из Введения, трех глав, Заключения и Списка литературы, включающего 31 источник. В главе 1 представлено устройство и принцип действия гиротрона, дан вывод основных уравнений квазилинейной теории гиротрона двух конкурирующих мод. Найдены неподвижные точки этой системы, построена плоскость параметров, проанализирована динамика автономной системы на фазовой плоскости при различных значениях параметров возбуждения. Приведены зоны генерации на основе теории гиротрона в приближении фиксированной структуры ВЧ поля. В главе 2 рассматривается синхронизация внешним сигналом. Проанализирована динамика системы при внешнем воздействии на собственной частоте. Опираясь на результаты одномодовой мо-

дели, полученные в работе [16], были получены языки синхронизации двухмодовой системы и проанализированы временные реализации при различных параметрах расстройки частоты и амплитуды внешнего воздействия. В 3 главе рассматривается синхронизация гиротрона с фиксированной гауссовой структурой высокочастотного поля в режиме жесткого возбуждения. Даны основные уравнения, построен фазовый портрет, построены амплитудные зависимости от времени, подтверждающие результаты квазилинейной модели.

В Заключение сформулированы основные результаты и выводы.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении описывается актуальность работы, основные сферы применения гиротрона, сформулированы цель и задачи работы.

Глава 1 посвящена описанию математической модели двухмодового гиротрона и анализу динамики автономной системы. В разделе 1.1 кратко описаны устройство, принцип действия гиротрона и механизм взаимодействия электронного пучка с ВЧ-полем. В разделе 1.2 приведены основные уравнения квазилинейной теории гиротрона [1,3,10,17]. В разделе 1.3 проведена модификация квазилинейной модели в случае, когда учитывается две конкурирующие моды. В рамках этой теории динамику системы можно опи-

сать уравнениями

$$\begin{aligned} \frac{dA_1}{dt} &= (\sigma_1 + |A_1|^2 + 2|A_2|^2 - |A_1|^4 - 6|A_1|^2|A_2|^2 - 3|A_2|^4)A_1, \\ \frac{dA_2}{dt} &= (\sigma_2 + |A_2|^2 + 2|A_1|^2 - |A_2|^4 - 6|A_1|^2|A_2|^2 - 3|A_1|^4)A_2. \end{aligned} \quad (1)$$

где  $A_{1,2}$  — медленно меняющиеся комплексные амплитуды мод,  $\sigma_{1,2}$  — параметры возбуждения. При  $-1/4 < \sigma_{1,2} < 0$  возможно жесткое возбуждение соответствующей моды.

В разделе 1.4 проводится анализ неподвижных точек автономной системы (1) на устойчивость и приводится разбиение плоскости параметров на области различных характерных режимов.

В разделе 1.5 представлены фазовые портреты при изменении параметров возбуждения. Для наших целей основной интерес представляет ситуация, когда одна мода возбуждается жёстким образом, а вторая — мягким. Фазовый портрет для этого случая представлен на рис. 1.

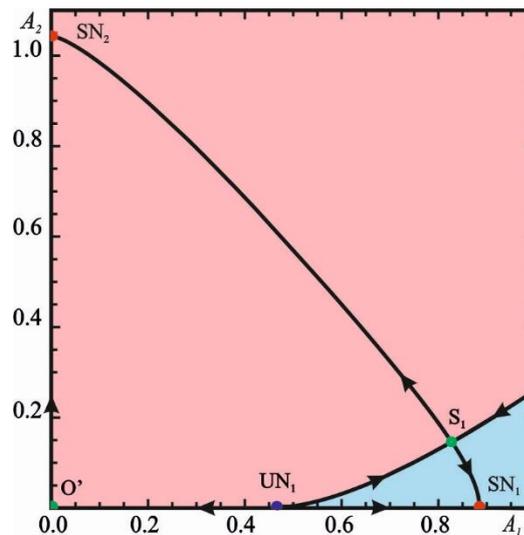


Рис. 1. Фазовый портрет при  $\sigma_1 = -0.17$  и  $\sigma_2 = 0.1$ . Бассейны притяжения устойчивых неподвижных точек: голубым цветом – основной моды, розовым – паразитной.

В главе 2 обсуждается синхронизация квазилинейной модели двухмодового генератора с жестким возбуждением. В разделе 2.1 изложены основные результаты, полученные для синхронизации одномодовой модели с жестким возбуждением, следуя [16]. При воздействии внешнего сигнала уравнения (1) принимают вид

$$\begin{aligned} \frac{dA_1}{dt} &= \left( \sigma_1 + |A_1|^2 + 2|A_2|^2 - |A_1|^4 - 6|A_1|^2|A_2|^2 - 3|A_2|^4 \right) A_1 + fe^{i\Delta t}, \\ \frac{dA_2}{dt} &= \left( \sigma_2 + |A_2|^2 + 2|A_1|^2 - |A_2|^4 - 6|A_1|^2|A_2|^2 - 3|A_1|^4 \right) A_2, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $f$  — амплитуда внешнего воздействия,  $\Delta$  — отстройка частоты внешнего воздействия от собственной частоты первой моды.

В разделе 2.2 рассматривается синхронизация при воздействии внешним сигналом точно на собственной частоте рабочей моды. В этом случае система уравнений редуцируется к системе второго порядка, которую можно проанализировать на фазовой плоскости. При малой амплитуде внешнего воздействия у системы существуют два аттрактора. Один из них соответствует режиму синхронизации основной моды, а другой — режиму, в котором наряду с основной присутствуют колебания паразитной моды. При увеличении амплитуды внешнего воздействия вначале увеличивается бассейн притяжения основной моды, а затем происходит асинхронное подавление колебаний второй моды.

В разделе 2.3 проводится изучение процессов перехода в режим синхронизации при ненулевой расстройке  $\Delta$ . Линии различных бифуркаций на плоскости  $\Delta, f$  были построены численно с помощью пакета XPPAUTO, при значении параметров возбуждения  $\sigma_1 = -0.17$ ,  $\sigma_2 = 0.1$  (рис. 2). Красным и синим цветом показаны линии седлоузловой бифуркации и бифуркации Андронова-Хопфа при нулевой амплитуде второй моды, зеленым и оранжевым — линии соответствующих бифуркаций для состояния равновесия, отвечающего двухмодовому режиму. Сценарии перехода синхронного режима иллюстрируют характерные зависимости амплитуд колебаний от времени. При малой амплитуде воздействия наблюдаются двухчастотные квазипериодические колебания, т.е. классический режим биений. При дальнейшем увеличении амплитуды воздействия выше линии  $AN_1$  происходит жесткое возбуждение колебаний второй моды. Устанавливается двухмодовый режим, в котором амплитуды обеих мод постоянны, причем амплитуда колебаний рабочей моды резко уменьшается. Далее происходит переход к режиму биений, в котором амплитуды обеих мод являются модулированными, т.е., вообще говоря, возбуждаются квазипериодические колебания с тремя независимыми частотами (собственные частоты двух мод и частота внешнего сигнала). Затем внешнее воздействие полностью подавляет собственные колебания вто-

рой моды. Следуя работе [21], будем называть этот режим асинхронным подавлением колебаний паразитной моды внешним сигналом, поскольку сигнал воздействует на частоте, близкой к частоте первой моды.

Таким образом, область трехчастотных колебаний на рис. 2 ограничена линиями  $AH_3$ ,  $SN_3$  и  $SN_2$ . Качественно она имеет вид, аналогичный двухмодовой системе с мягким возбуждением [21].

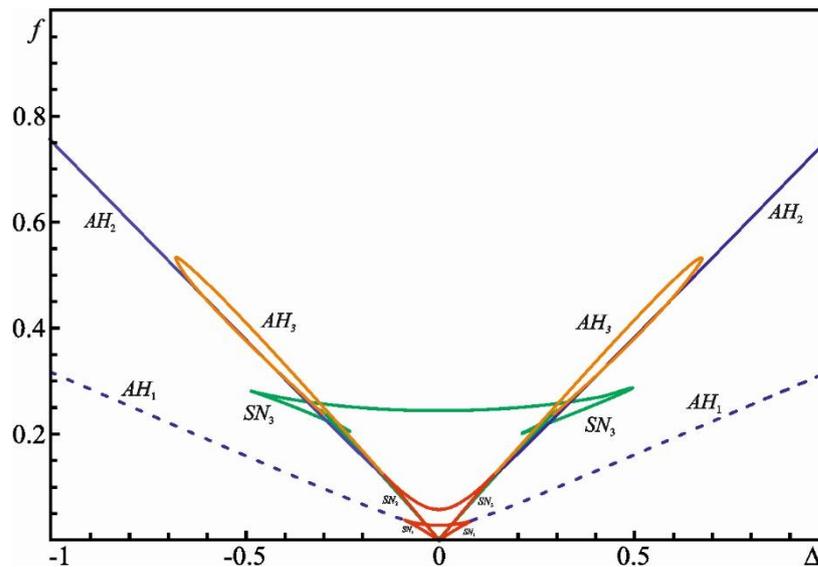


Рис. 2 Картина бифуркационных линий на плоскости параметров  $\Delta$ ,  $f$  при  $\sigma_1 = -0.17$ ,  $\sigma_2 = 0.1$ .

В главе 3 рассматривается численное моделирование синхронизации гиротрона с фиксированной гауссовой структурой ВЧ поля в режиме жесткого возбуждения. В разделе 3.1 приведены основные уравнения нестационарной теории гиротрона с фиксированной структурой ВЧ поля [1]. В разделе 3.2 приведены результаты численного моделирования в среде программирования Delphi 7.0. На рис. 3 приведены проекции фазовых траекторий на плоскость. По осям отложены  $|A_1|$ ,  $|A_2|$ . Точки, расположенные по горизонтальной и вертикальной осях можно определить, проводя моделирование для одномодового случая, так как они соответствуют одномодовой генерации. Неподвижную точку типа седло  $S_1$  таким образом найти не удастся, так как для нее амплитуды обеих мод отличны от нуля. Как видно из рисунка, ре-

результаты хорошо согласуются с результатами теоретического анализа квазилинейной модели (рис. 1).

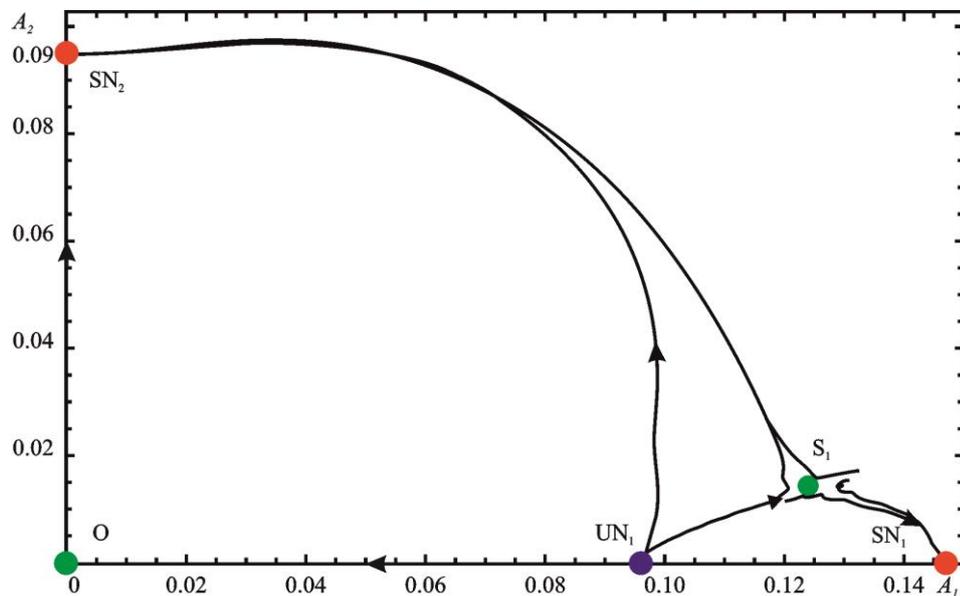


Рис. 3. Проекция фазовых траекторий для нестационарной модели гиротрона с гауссовой структурой ВЧ поля при  $I_s = 0.06$ ,  $\Delta_H = 0.53$ ,  $\mu = 15$ ,  $\Delta_s = 0.2$ .

Показано, что наблюдаются те же режимы, что были найдены для квазилинейной модели (п. 2.2). При малых  $f$  для перехода в режим синхронизации начальная амплитуда рабочей моды должна быть достаточно велика. При увеличении амплитуды внешнего сигнала вначале происходит бифуркация слияния седла  $O$  и неустойчивого узла  $UN_1$ , в результате чего бассейн притяжения точки  $SN_1$  захватывает начало координат. После этого установление синхронного режима становится возможным даже в случае, когда начальная амплитуда мала. При дальнейшем увеличении  $f$  происходит слияние седла  $S_1$  и устойчивого узла  $SN_2$ , после чего точка  $SN_1$  становится единственным аттрактором и установление синхронизации происходит при любых начальных условиях, даже в случае, когда начальная амплитуда паразитной моды велика, что иллюстрирует рис. 4.

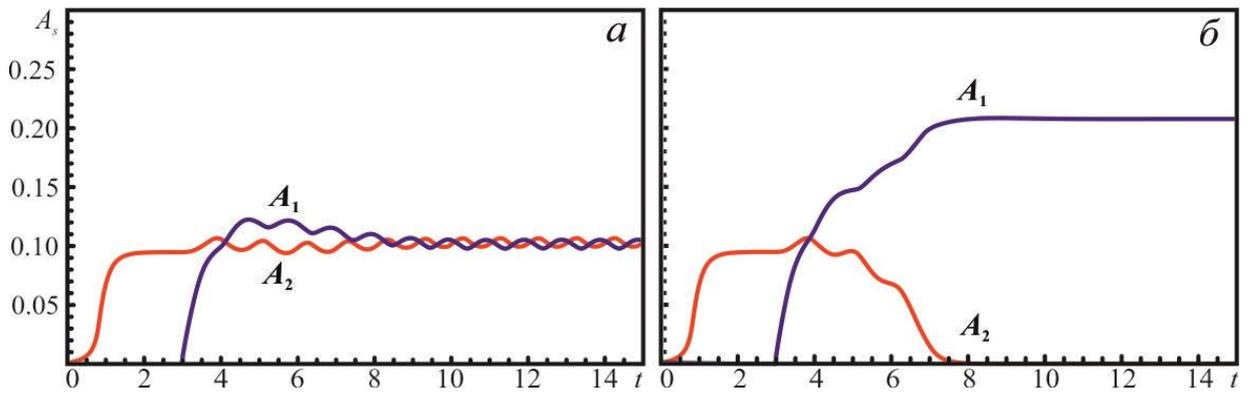


Рис. 4. Амплитудные зависимости от времени при  $I_s = 0.06$ ,  $\Delta_H = 0.53$ ,  $\mu = 15$ ,  $\Delta_s = 0.2$ ,  $A_1(0) = A_2(0) = 0.001$  и различных значениях амплитуд внешнего воздействия.  $f = 0.1$  (а),  $f = 0.11$  (б). Внешняя сила подается в момент времени  $t = 3$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были получены следующие основные результаты.

1. На основе уравнений квазилинейной теории сформулирована двухмодовая модель гиротрона для двух конкурирующих мод. Модель описывается дифференциальными уравнениями для медленно меняющихся амплитуды и фазы колебаний.

2. Была проанализирована автономная квазилинейная модель двухмодового генератора на плоскости параметров возбуждения в случае, когда собственные частоты мод близки друг к другу. Выбирая различные параметры возбуждения, были построены фазовые портреты. 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 изменения параметров.

3. При воздействии внешним сигналом на двухмодовую модель, также была рассмотрена динамика на фазовой плоскости, при частоте в точности равной собственной частоте. При малой амплитуде внешнего воздействия у системы существуют два аттрактора. Один из них соответствует режиму синхронизации основной моды, а другой — режиму, в котором наряду с основной присутствуют колебания паразитной моды. При увеличении амплитуды внешнего воздействия вначале увеличивается бассейн притяжения основной моды, а затем происходит асинхронное подавление колебаний второй моды.

4. Проведено численное моделирование процессов перехода в режим синхронизации двухмодовой системы. Были построены линии бифуркации и временные реализации при различных значениях амплитуды внешнего воздействия и расстройки частоты. В дополнении к одномодовым режимам генерации, был найден двухмодовый режим, а также модулированные колебания двух мод — трехчастотный режим. В этом отношении картина качественно совпадает с результатами для двухмодовой модели с мягким возбуждением, представленными в работе [21].

5. Проведено численное моделирование синхронизации гиротрона с фиксированной гауссовой структурой высокочастотного поля. Как и для квазилинейной модели, рассмотрен случай, когда возбуждение рабочей моды происходит жестко, а паразитной — мягко. Результаты моделирования качественно согласуются с результатами теоретического анализа квазилинейной модели (гл. 2). Был построен фазовый портрет, имеющий структуру, аналогичную квазилинейной модели. Показано, что с увеличением амплитуды внешнего сигнала вначале исчезает одномодовый режим регенеративного усиления внешнего сигнала, после чего переход в режим синхронизации становится возможным, даже когда начальное значение амплитуды рабочей моды мало. Затем исчезает двухмодовый режим и остается единственное устой-

чивое состояние, соответствующее синхронизованным колебаниям рабочей моды.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Nusinovich G.S. Introduction to the Physics of Gyrotrons. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2004.
2. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 2. М.: Физматлит, 2004.
3. 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.
4. Цимринг Ш.Е. Мазеры на циклотронном резонансе. Горький, 1988. 92 с.
5. Thumm M. Recent advances in the worldwide fusion gyrotron development // IEEE Trans. Plasma Sci. 2014. Vol. 42, No. 3. P. 590-599.
6. Bykov Yu., Ereemeev A., Glyavin M., Kholoptsev V., Luchinin A., Plotnikov I., Denisov G., Bogdashev A., Kalynova G., Semenov V., Zharova N. 24–84-GHz gyrotron systems for technological microwave applications // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. Vol. 32, No. 1. P. 67-72.
7. 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.
8. Kumar N., Singh U., Bera A., Sinha A.K. A review on the sub-THz/THz gyrotrons // Infrared Phys. Technol. 2016. Vol. 76. P. 38-51.
9. Зарницына И.Г., Нусинович Г.С. Об устойчивости синхронизованных одномодовых колебаний в многомодовом гиромонотроне // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18. № 3. С. 459-462.
10. Нусинович Г.С. Теория многомодового гиротрона // В сб. «Гиротрон». Горький: ИПФ АН СССР, 1981. С. 146-168.
11. Ергаков В.С., Моисеев М.А. К теории синхронизации МЦР-монотрона внешним сигналом // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18. № 1. С. 120-131.

12. McCurdy A.H., Armstrong C.M. Mode selection by application of an external signal in an overmoded gyrotron oscillator // *Phys. Rev. Lett.* 1988. Vol. 61. No. 20. P. 2316-2319.
13. Ginzburg N.S., Sergeev A.S., Zotova I.V. Time-domain self-consistent theory of frequency-locking regimes in gyrotrons with low-Q resonators // *Phys. Plasmas*. 2015. Vol. 22, No. 3. 033101.
14. 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.
15. Новожилова Ю.В., Денисов Г.Г., Глявин М.Ю., Рыскин Н.М., Бакунин В.Л., Богдашов А.А., Мельникова М.М., Фокин А.П. Стабилизация частоты гиротрона под влиянием внешнего монохроматического сигнала или отраженной от нагрузки волны: обзор // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2017. Т. 25, № 1. С. 4-11.
16. Yakunina K.A., Kuznetsov A.P., Ryskin N.M. Injection locking of an electronic maser in the hard excitation mode // *Physics of Plasmas*. 2015. Vol. 22. No. 11. 113107.
17. Nusinovich G.S. Review of the theory of mode interaction in gyrodevices // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1999. Vol. 27, No. 2. P. 313-326.
18. Моисеев М.А., Нусинович Г.С. К теории многомодовой генерации в гиромонотроне // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1974. Т. 17, № 11. С. 1709-1717.
19. Мельникова Г.Н., Тарантович Т.М. Конкуренция мод и режимы захвата автогенератора // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1976. Т.19, № 8. С. 1156-1161.
20. Нусинович Г.С., Родыгина Л.С., Тарантович Т.М. К теории синхронизации многомодовых генераторов с «жестким» самовозбуждением // *Радиотехника и электроника*. 1978. Т. 23, № 1. С. 91-96.
21. Перегородова Е.Н., Рыскин Н.М., Усачева С.А. Синхронизация системы двух конкурирующих мод внешним гармоническим сигналом // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2011. Т. 19, № 3. С. 154-170.