

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

**СТАБИЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ ГИРОТРОНА  
ЗАПАЗДЫВАЮЩИМ ОТРАЖЕНИЕМ ОТ НАГРУЗКИ**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 411 группы

направления 03.03.01 Прикладные математика и физика

факультета нелинейных процессов

Тышкун Александры Викторовны

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

\_\_\_\_\_

Н.М. Рыскин

дата, подпись

Зав. кафедрой нелинейной физики,

д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_

Н.М. Рыскин

дата, подпись

Саратов 2016 год

## ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение стабильности частоты различных генераторов — важная задача электроники. Генераторы сверхвысокочастотных (СВЧ) сигналов находят широкое применение в различных областях: в радиолокации, системах связи, в ускорительной технике и т.д. Одним из таких генераторов является мазер на циклотронном резонансе или гиротрон [1-3].

Принцип работы гиротрона основан на когерентном излучении вращающегося в постоянном магнитном поле пучка электронов. Взаимодействие пучка электронов с электромагнитной волной происходит только в случае выполнения условия циклотронного резонанса, т. е. поглощение энергии происходит только на частотах равных или кратных частоте вращения электронов в постоянном магнитном поле [1-3].

Сейчас основной практический интерес представляют гиротроны, работающие в непрерывном режиме. Это, во-первых, мощные гиротроны, применяемые в установках нагрева плазмы (длительность импульса — десятки минут), а также маломощные субмиллиметровые (терагерцевые) гиротроны, применяемые для ядерно-магнитно-резонансной спектроскопии с динамической поляризацией ядер (DNP-NMR), для диагностики плазмы и для ряда других приложений [3-5]. В этом случае длительность работы в непрерывном режиме может составлять десятки часов. Такой источник должен обеспечивать стабильный сигнал с плавной перестройкой частоты в пределах 2-3 ГГц и умеренной мощностью (десятки Ватт). Очевидно, что вопрос повышения стабильности частоты имеет ключевое значение.

Одним из способов стабилизации частоты СВЧ генераторов является так называемая автосинхронизация запаздывающим сигналом, когда выходной сигнал генератора частично возвращается в колебательную систему генератора по цепи внешней обратной связи. Этот метод применяется, например, для магнетронов [6–8]. Однако в этих работах в основном обсуждается использование автосинхронизации для подавления собственных шумов генератора [6,7] или для увеличения выходной мощности [8].

В работе [9] было предложено стабилизировать частоту гиротрона с помощью сигнала, отраженного от выходного окна или других элементов выходного тракта. Влияние отраженного сигнала на работу гиротрона широко исследовалось (см., например, [10–13]), однако вопрос стабилизации частоты не рассматривался, а обсуждалось в основном влияние отражений на выходную мощность, процессы автомодуляции и конкуренции мод. Важно отметить, что характер влияния отражений зависит не только от амплитуды отраженного сигнала, но и от фазы, которая определяется временем распространения сигнала от резонатора гиротрона к выходному окну [13]. Поскольку длина волны генерируемого излучения много меньше расстояния до нагрузки, принципиальным является учет запаздывающего характера отраженного сигнала.

**Целью** данной работы является теоретический анализ стабилизации частоты генерации гиротрона при помощи запаздывающего сигнала. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- развитие квазилинейной модели гиротрона, на который воздействует запаздывающий сигнал, отраженный от удаленной нагрузки;
- вывод теоретических выражений для коэффициента стабилизации частоты и ширины полосы стабилизации;
- проверка теоретических результатов с помощью численного моделирования.

Выпускная квалификационная работа содержит 41 страницу текста и состоит из Введения, трех глав, Заключения и Списка литературы, включающего 38 источников. В главе 1 представлено устройство и принцип действия гиротрона, описана схема стабилизации частоты прибора отраженным сигналом, дан вывод основных уравнений квазилинейной теории гиротрона с учетом отраженного сигнала или сигнала, поступающего по цепи внешней обратной связи. Получено дифференциальное уравнение с запаздыванием, описывающее динамику медленно меняющейся амплитуды колебаний. В главе 2 проводится теоретический анализ стабилизации частоты отраженным

сигналом. Аналитически получены зависимости амплитуды и частоты генерации от собственной частоты резонатора. Введены понятия коэффициента стабилизации частоты и ширины полосы стабилизации. Показано, что эти величины в основном определяются коэффициентом отражения и временем запаздывания. Проведено сопоставление теоретического анализа с результатами численного моделирования. В 3 главе рассмотрено применение метода стабилизации частоты для гиротрона диапазона 670 ГГц, параметры которого приведены в работе [14]. Произведено численное моделирование с квазистатическим изменением частотной расстройки. Полученные численные значения коэффициента стабилизации и ширины полосы стабилизации хорошо согласуются с теоретическими зависимостями. Поскольку система с запаздыванием является распределенной, за счет отражений возникают новые типы колебаний (так называемые моды длинной линии), число которых увеличивается при росте отражений и времени запаздывания. Исследован характер переходных процессов при переходах из неустойчивых стационарных состояний в устойчивые. Произведен переход к более реалистичной ситуации, когда собственная частота резонатора непрерывно меняется во времени.

В Заключении 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 гиротрона с запаздывающим отражением. В разделе 1.1 кратко описаны устройство, принцип действия гиротрона и механизм взаимодействия электронного пучка с ВЧ-полем.

В разделе 1.2 описана схема стабилизации частоты гиротрона отраженным сигналом. На примере работы [15] рассмотрено, как изменяется частота

генерации гиротрона со временем, приведены экспериментальные результаты, свидетельствующие о флуктуациях частоты генерации.

В разделе 1.3 приведены основные уравнения квазилинейной теории гиротрона [16-18]. В рамках этой теории динамику гиротрона можно описать уравнением

$$\frac{dA}{dt} + i(\omega_0 - \omega_s)A + \frac{\omega_s}{2Q}A = \frac{\omega_0 I_s}{2Q}(\alpha - \beta|A|^2)A. \quad (1)$$

Здесь  $A$  — медленно меняющаяся комплексная амплитуда,  $\omega_0$  — опорная частота,  $\omega_s$  — собственная частота резонатора,  $Q$  — добротность,  $I_s$  — нормированный ток электронного пучка,  $\alpha$  и  $\beta$  коэффициенты разложения комплексного коэффициента электронной восприимчивости по степеням амплитуд, характеризующие соответственно линейное усиление и нелинейное насыщение собственным полем.

В разделе 1.4 проведена модификация уравнения квазилинейной теории гиротрона в случае, когда учитывается сигнал, отраженный от удаленной нагрузки. Получено уравнение

$$\frac{dA}{dt} - i\Delta A = \left(\sigma - (1 + ib)|A|^2\right)A + \rho e^{-i\psi} A(t - \tau), \quad (2)$$

где  $\Delta$  — безразмерная расстройка между собственной и опорной частотами,  $\sigma$  — параметр, характеризующий превышение тока пучка над стартовым,  $b$  — параметр реактивной нелинейности,  $\rho \exp(-i\psi)$  — комплексный параметр отражений,  $\tau$  — нормированное время задержки.

Глава 2 посвящена теоретическому анализу стабилизации частоты гиротрона запаздывающим отражением. В разделе 2.1 анализируются решения уравнения (2) в виде одночастотных колебаний и получено выражение, связывающее частоту генерации и собственную частоту резонатора

$$\Delta = \omega + \beta(\sigma + \rho \cos(\omega\tau + \psi)) + \rho \sin(\omega\tau + \psi) \quad (3)$$

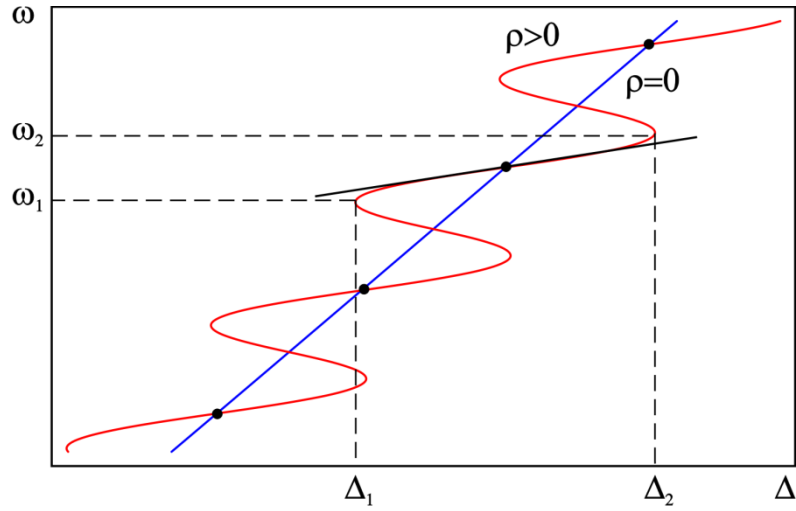


Рис. 1. Зависимость нормированной частоты генерации от нормированной частотной расстройки.

Из уравнения (3) видно, что если отражения отсутствуют, сдвиг частоты  $\omega$  пропорционален расстройке  $\Delta$ . При наличии отражений, наклон кривой  $\omega(\Delta)$  на устойчивых участках этой зависимости уменьшается (рис. 1), появляются близкие к горизонтальным «полочки», которые свидетельствуют о стабилизации частоты.

В разделе 2.2 введены в рассмотрение коэффициент стабилизации  $K_\omega$  и

$$K_\omega = \left( \frac{d\omega}{d\Delta} \right)_{\omega_{st}}, \quad (4)$$

где  $\omega_{st}$  — частота, на которой происходит стабилизация, и ширина полосы стабилизации (см. рис. 1)

$$\Delta_{st} = \Delta_2 - \Delta_1. \quad (5)$$

Для этих величин получены следующие соотношения

$$K_\omega = 1 + \rho\tau, \quad (6)$$

$$\Delta_{st} = \frac{2\left(\pi - \arccos(1/\rho\tau) + \sqrt{\rho^2\tau^2 - 1}\right)}{\tau}. \quad (7)$$

При  $\rho\tau \gg 1$  имеем приближенные формулы

$$\begin{aligned}\Delta_2 - \Delta_1 &\approx \frac{\pi}{\tau} + 2\rho, \\ \omega_2 - \omega_1 &\approx \frac{\pi}{\tau}.\end{aligned}\tag{8}$$

В разделе 2.3 производится сопоставление теоретического анализа с результатами численного моделирования. Они подтверждают сделанные в разделе 2.2 выводы о влиянии коэффициента отражения и времени запаздывания на ширину полосы стабилизации и коэффициент стабилизации.

В главе 3 метод стабилизации частоты применяется для гиротрона диапазона 670 ГГц, с рабочей модой  $TE_{31,8}$ . Параметры гиротрона были взяты из статьи [14].

В разделе 3.1 приводятся параметры гиротрона.

В разделе 3.2 представлены результаты численного моделирования при квазистатическом изменении частотной расстройки. Результаты, во-первых, в точности соответствуют теоретическим зависимостям, а во-вторых демонстрируют такое же поведение, которое отмечалось в разделе 2.3. А именно, ветви с отрицательным наклоном являются неустойчивыми. Также неустойчивы небольшие участки вблизи соединения двух ветвей, что хорошо согласуется с анализом устойчивости стационарных состояний генератора с запаздывающим отражением, проведенным в работе [19]. При переходе через границу устойчивости наблюдаются жесткие переходы к соседним устойчивым состояниям, сопровождаемые гистерезисом. Направления переходов показаны на рис. 2 стрелками. Из рис. 2а видно, что при значениях коэффициента отражения  $\rho = 0.3$  и времени задержки  $\tau = 14.4$  ширина полосы стабилизации  $\Delta_2 - \Delta_1 \approx 150$  МГц, а частота генерации изменяется на величину порядка 30 МГц. Коэффициент стабилизации составляет  $K_\omega \approx 5.33$ .

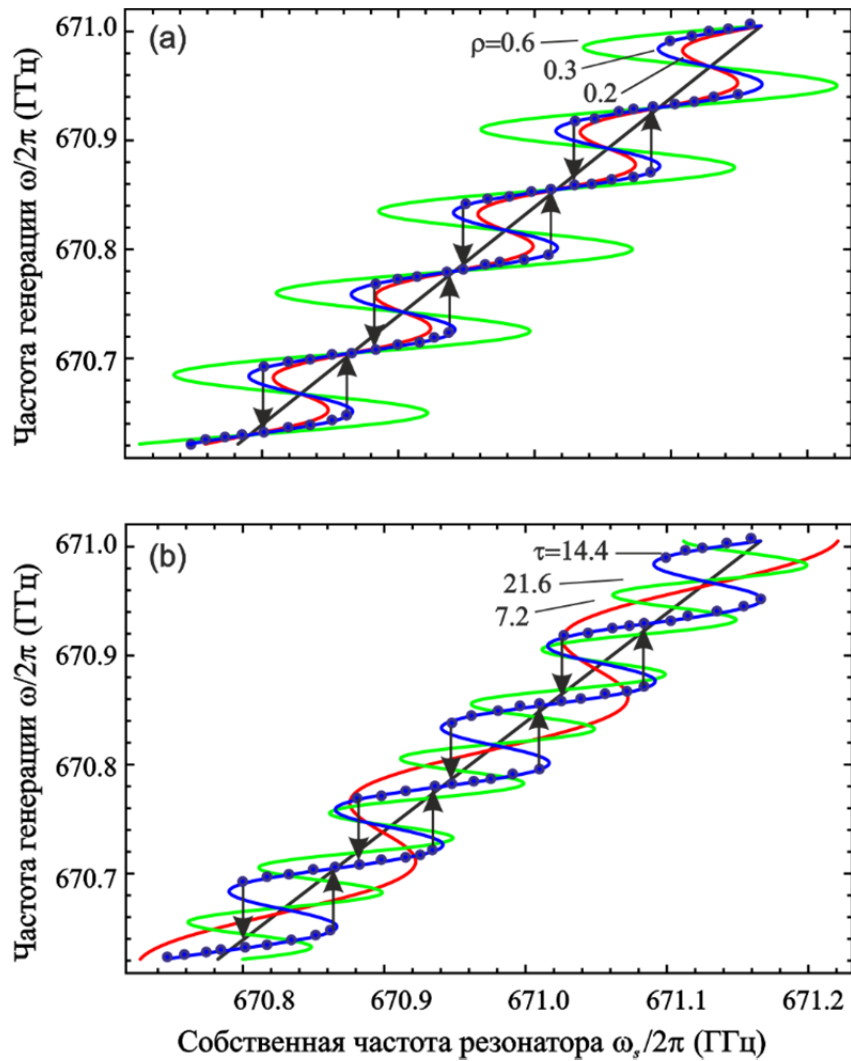


Рис. 2. Зависимости частоты генерации от собственной частоты при различных значениях коэффициента отражения: (а)  $\rho = 0.2, 0.3, 0.6$  и фиксированном  $\tau = 14.4$ ; (б) при различных значениях времени запаздывания:  $\tau = 7.2, 14.4, 21.6$  при фиксированном значении коэффициента отражения  $\rho = 0.3$ .

В разделе 3.3 проводится численное моделирование более реалистичной ситуации, когда расстройка изменяется со временем. Для простоты эта зависимость была выбрана линейной:

$$\Delta(t) = \alpha t, \quad (9)$$

где  $\alpha$  — коэффициент скорости изменения собственной частоты, который выбирается достаточно малым:  $\alpha = \pm 0.001$ , где знаки « $\pm$ » соответствуют увеличению или уменьшению собственной частоты со временем.



В работе приведены результаты численного моделирования. Они показывают хорошее соответствие с теоретическими зависимостями, а также выявили устойчивые и неустойчивые состояния. Когда расстройка выходит за границы области устойчивости, происходит скачкообразный переход к ближайшему по частоте устойчивому состоянию, при этом мгновенная частота демонстрирует постепенно затухающие осцилляции. Было рассмотрено влияние коэффициента  $\alpha$  на зависимости, получаемые в ходе численного моделирования. Так при уменьшении  $\alpha$  участки, на которых частота стабилизирована, увеличиваются, а осцилляции частоты сокращаются.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

1. На основе уравнений квазилинейной теории сформулирована модель гиротрона, на который воздействует сигнал, отраженный от удаленной нагрузки или поступающий по цепи внешней обратной связи. Модель описывается дифференциальным уравнением с запаздывающим аргументом для медленно меняющейся комплексной амплитуды сигнала.

2. Для разработанной модели получено аналитическое выражение для зависимости частоты генерации от собственной частоты резонатора гиротрона. При введении отражений или внешней обратной связи на этой зависимости образуются «полочки», в пределах которых частота генерации меняется слабо, т.е. происходит стабилизация частоты. Введены понятия коэффициента стабилизации частоты и ширины полосы стабилизации. Под коэффициентом стабилизации частоты понимаем отношение изменения частоты генерации гиротрона к изменению собственной частоты резонатора. Под шириной полосы стабилизации понимаем диапазон изменения собственной частоты в пределах одной «полочки».

3. Получены аналитические выражения для коэффициента стабилизации и ширины полосы стабилизации. Показано, что их значения определяются главным глубиной обратной связи  $\rho$  и временем запаздывания  $\tau$ . Коэффициент стабилизации увеличивается при увеличении этих параметров, в то время как ширина полосы стабилизации увеличивается с ростом  $\rho$  и уменьшается с ростом  $\tau$ .

4. Проведено численное моделирование для гиротрона диапазона 670 ГГц, параметры которого взяты из работы [14]. Численные результаты хорошо согласуются с теоретическими. Показано, что для рассматриваемого гиротрона можно обеспечить коэффициент стабилизации частоты порядка 5 и ширину полосы стабилизации порядка 100-250 МГц при глубине обратной связи менее 0.3 (т.е. не более 10 % по мощности) и времени задержки порядка 10 нс.

5. Численное моделирование позволяет установить, какие стационарные состояния являются устойчивыми, какие — неустойчивыми. При моделировании плавно изменялась собственная частота резонатора, а остальные параметры оставались постоянными. Когда стационарное состояние теряет устойчивость, наблюдается скачкообразный переход к ближайшему по частоте устойчивому состоянию. При движении в прямом и обратном направлении эти переходы происходят с гистерезисом.

6. В случае, когда собственная частота линейно изменяется во времени, стабилизация частоты возможна, когда скорость изменения собственной частоты не превышает величин порядка 0.2 МГц/нс. При этом результаты моделирования хорошо согласуются как с теоретическими, так и с численными, когда собственная частота изменяется квазистатически.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Nanni E.A., Barnes A.B., Griffin R.G., Temkin R.J. THz dynamic nuclear polarization NMR // *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2011. Vol. 1, No. 1. P. 145–163.
5. 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. Vol. 517, No. 4. P. 1503–1506.
6. Choi J. J, Choi G. W. Experimental observation of frequency locking and noise reduction in a self-injection-locked magnetron // *IEEE Trans. Electron Devices* 2007. Vol. 54, No. 12. P. 3430–3432
7. Baek S., Balk M., Kim K., Kim H., Choi J. Unique multi-physics approach of self phase locked magnetron (SPLM) system with CST STUDIO SUITE // *Proc. 14th IEEE Int. Vac. Electron. Conf., Paris, France 2013*. P. 1–3.
8. Bliokh Y.P., Krasik Y.E., Felsteiner J. Self-injection-locked magnetron as an active ring resonator side coupled to a waveguide with a delayed feedback loop // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2012. Vol. 40, No. 1. P. 78–82
9. Глявин М.Ю., Денисов Г.Г., Кулыгин М.Л., Новожилова Ю.В. Стабилизация частоты гиротрона отражением от резонансной и нерезонансной нагрузки // *Письма в ЖТФ* 2015. Т. 41, № 13. С. 25–32.
10. Гинзбург Н.С., Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Моисеев М.А., Новожилова Ю.В. Использование отражения с запаздыванием для получения автомодуляционных и стохастических режимов генера-

- ции в гиротронах миллиметрового диапазона // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24, No. 11. P. 53–59.
11. Antonsen T.M., Jr., Cai S.Y., Nusinovich G.S., Effect of window reflection on gyrotron operation // Phys. Plasmas. 1992. Vol. 4, No. 12. P. 4131–4139.
  12. Glyavin M.Y., Zapevalov V.E., Reflections influence on the gyrotron oscillation regimes // Int. J. Infr. Millim. Waves. 1998. Vol. 19, No. 11, P. 1499–1511.
  13. Chumakova M.M., Usacheva S.A., Glyavin M.Y., Novozhilova Y.V., Ryskin N.M. Mode competition in a two-mode gyrotron with delayed reflections // IEEE Trans. Plasma Sci. 2014. Vol. 42, No. 8. P. 2030–2036.
  14. Глявин М.Ю., Лучинин А.Г., Богдашов А.А., Мануилов В.Н., Морозкин М.В., Родин Ю., Денисов Г.Г., Кашин Д., Роджерс Дж., Ромеро-Таламас К.А., Пу Р., Шкварунец А.Г., Нусинович Г.С. Экспериментальное исследование импульсного терагерцового гиротрона с рекордными значениями мощности и эффективности // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 8-9. С. 550-561.
  15. Schlaich A., Gantenbein G., Illy S., Jelonnek J., Thumm M. Observation of discrete frequency hopping in MW-class gyrotrons during long-pulse operation // IEEE Trans. Electron Devices. 2015. Vol. 62. No. 9. P. 3049–3055.
  16. Нусинович Г.С. Теория многомодового гиротрона // В сб. «Гиротрон». Горький: ИПФ АН СССР, 1981. С. 146-168.
  17. Nusinovich G.S. Mode interaction in gyrodevices // Int. J. Electron. 1981. V. 51. No. 4. P. 457-474.
  18. Вайнштейн Л.А. Общая теория резонансных электронных автогенераторов // Электроника больших мощностей. Сб. 6. М.: Наука. 1969. С. 84-129.
  19. Новожилова Ю.В., Рыскин Н.М., Усачева С.А. Нестационарные процессы в генераторе с запаздывающим отражением от нагрузки // ЖТФ. 2011. Т. 81, вып. 9. С. 16-22.