

УДК

# Управление и стабилизация выходных характеристик субтерагерцовых гиротронов варьированием технических параметров

В.Е. Запевалов<sup>1</sup>, А.С. Седов<sup>1</sup>, А.А. Орловский<sup>1,2</sup> А.И. Цветков<sup>1,2</sup>, Н.В. Чекрмарев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН

<sup>2</sup>Волжский государственный университет водного транспорта

**Аннотация:** В данной работе представлены результаты теоретических, численных и экспериментальных исследований направленных на управление и стабилизацию выходных параметров субтерагерцовых гиротронов среднего уровня мощности. В том числе рассматривается многопараметрическое изменение входных параметров обеспечивающее стабилизацию мощности при изменении частоты работы прибора

**Ключевые слова:** гиротрон, СВЧ, стабилизация, терагерцовые волны

## 1. Введение

Гиротроны субтерагерцового и терагерцового диапазона частот являются уникальными источниками электромагнитного излучения, поскольку с одной стороны они обеспечивают сравнительно высокие уровни непрерывной и импульсной мощности в указанном диапазоне, а с другой стороны не столь масштабны как лазеры на свободных электронах [1,2]. Гиротроны данного класса востребованы для решения многих научных и технологических задач, в том числе спектроскопия высокого разрешения, диагностика плазмы, создания газового разряда, производство новых материалов с уникальными характеристиками [3] и другие.

При этом можно выделить несколько основных направлений, в которых ведутся теоретические и экспериментальные работы по совершенствованию гиротронов. Это повышение выходной мощности и частоты, улучшение эффективности электронно-волнового взаимодействия, транспортировка и преобразования выходного излучения в электродинамических системах, совершенствование магнитных систем и так далее. Особый интерес в последнее время представляют процессы стабилизации и управления выходными параметрами. Разработка данных методов может помочь при решении целого ряда задач, в том числе синхронизации гиротронных комплексов, захват частоты, спектроскопических и технологических приложений.

В данной работе описываются результаты теоретических, численных и экспериментальных исследований направленных на управление и стабилизацию выходных параметров субтерагерцовых гиротронов среднего уровня мощности. В том числе рассматривается многопараметрическое изменение входных параметров, обеспечивающее стабилизацию мощности при изменении частоты работы прибора.

## 2. Общее описание математической модели

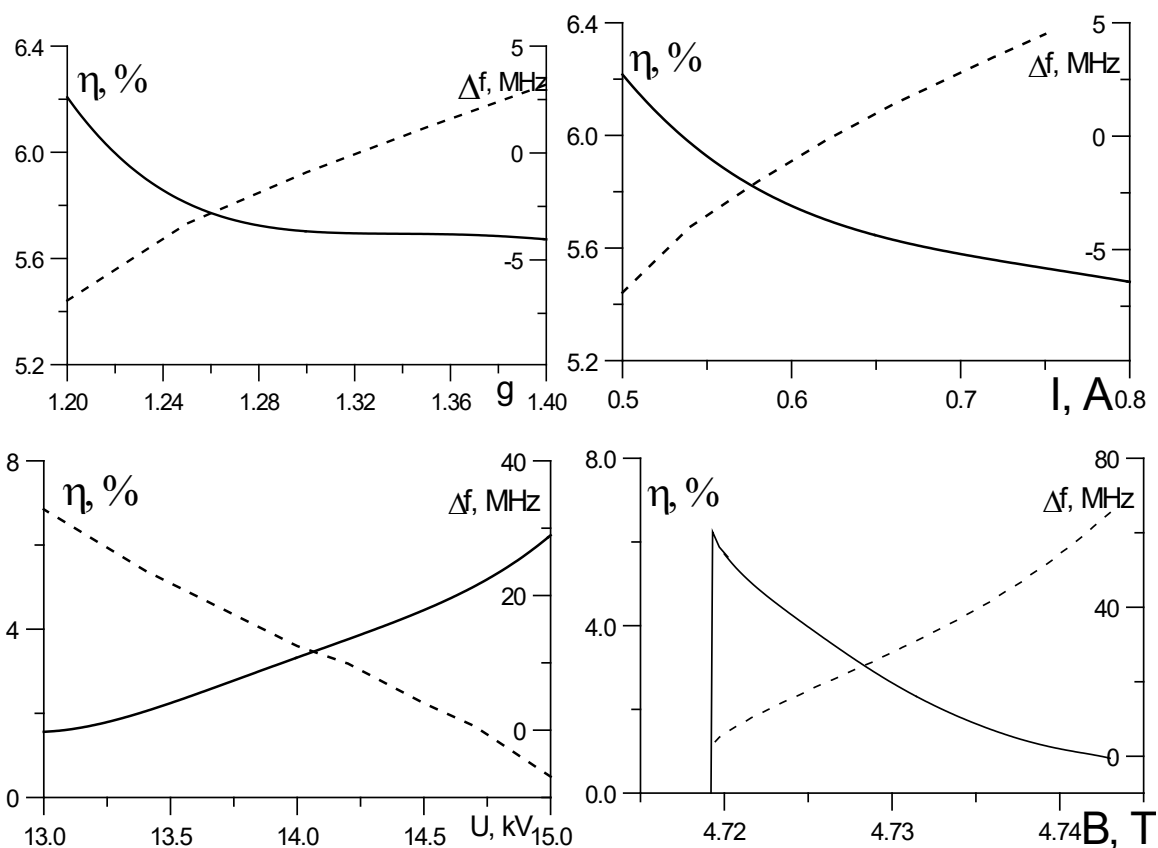
В процессе управления гиротронным комплексом оператор может изменять определенные физические параметры, основными из которых являются ток пучка в основном и дополнительном (так называемая катодная катушка) соленоиде, напряжение (как катодное, так и анодное), мощность подогревателя катода (от которой зависит ток пучка), температуру охлаждающей резонатор жидкости и другие. Для понимания того, как изменение данных параметров влияет на выходные параметры гиротрона, необходима разработка математической модели, которая была с одной

стороны относительно проста в использование и позволяла быстро и эффективно рассчитать приведённые выше зависимости. С другой стороны данная модель должна учитывать все приведённые выше параметры, а также иметь возможность включения тех характеристик, на которые оператор не может менять непосредственно, но которые все равно могут оказывать существенное влияние на режим работы прибора (например разброс скоростей в электронном пучке или поле пространственного заряда). Обозначенными выше требованиям обладают так называемые усредненные модели, то есть те, которые считают поперечную структуру волны в резонаторе фиксированной, что позволяет свести задачу к одномерной (рассчитывать изменение параметров только вдоль оси прибора). Стоит отметить, что данные модели могут быть стационарными или нестационарными, а так же включать рассмотрение взаимодействия нескольких конкурирующих мод. В данной работе мы будем рассматривать стационарную одномодовую модель с нефиксированной продольной структурой ВЧ-поля в резонаторе [4]. При этом некоторые из управляющих параметров, описанных выше, входят в данную численную модель непосредственно (например, ускоряющее напряжение), а некоторые нужно пересчитывать (например, питч-фактор, то есть отношение поперечной и продольной скорости электронов, является комбинацией ускоряющего, анодного напряжений, токов соленоидов). Таким образом, варьируя параметры математической модели можно получать требуемые зависимости выходных параметров. Аналитическое же описание данных процессов невозможно, во-первых из-за сложности даже одномерных нестационарных моделей, а во вторых из-за того для различных комбинаций управляющих параметров характер данных зависимостей может существенно меняться, например монотонная функция может стать функцией с максимумом и так далее. Таким образом, аналитическое и численное исследования данных процессов сводится к поиску рабочего режима. А затем моделированию массива выходных параметров в зависимости от определенного числа параметров входящих в модель с последующей линейно, если это возможно, аппроксимацией.

### **3. Расчеты и эксперимент 259 ГГц гиротрона**

В качестве первого примера реализации описанного выше метода рассматривался непрерывный 259 ГГц гиротрон, работающий на второй циклотронной гармонике. Для фиксированных параметров электронного пучка была выполнена оптимизация электродинамической системы, в результате которой были выбраны параметры данной системы и определен рабочий режим. Затем в окрестностях данного режима происходила последовательная вариация четырех параметров, входящих в модель (магнитное поле, питч-фактор, ток электронного пучка, ускоряющее напряжение). На рисунке 1 приведены зависимости КПД (сплошные линии) и отклонения частоты (пунктирные линии) от каждого из названных выше параметров, при фиксированных остальных. Таким образом, одновременно решались две задачи. Первая связана с тем, что полученные зависимости показывают возможности перестройки частоты и мощности генерации гиротрона. Вторая же задача была связана с выбором источников питания, которые гарантировали требуемые заказчиком уровни стабильности частоты и мощности. При линеаризации зависимостей в окрестности стационарного состояния можно получить коэффициенты пропорциональности между параметрами пучка и выходными характеристиками гиротрона, с помощью которых и выбирались данные источников.

Правильность полученных данных была подтверждена в ходе испытаний данного гиротрона, которые продемонстрировали требуемый уровень стабильности выходных параметров при достаточно длительной (порядка несколько десятков часов) непрерывной работе комплекса [5].



**Рисунок 1.** Зависимости КПД (сплошные линии) и отстройки частоты (пунктирные линии) для каждого из параметров (питч-фактор, ток пучка, напряжение, магнитное поле), при фиксированных остальных в 259 ГГц гиротроне.

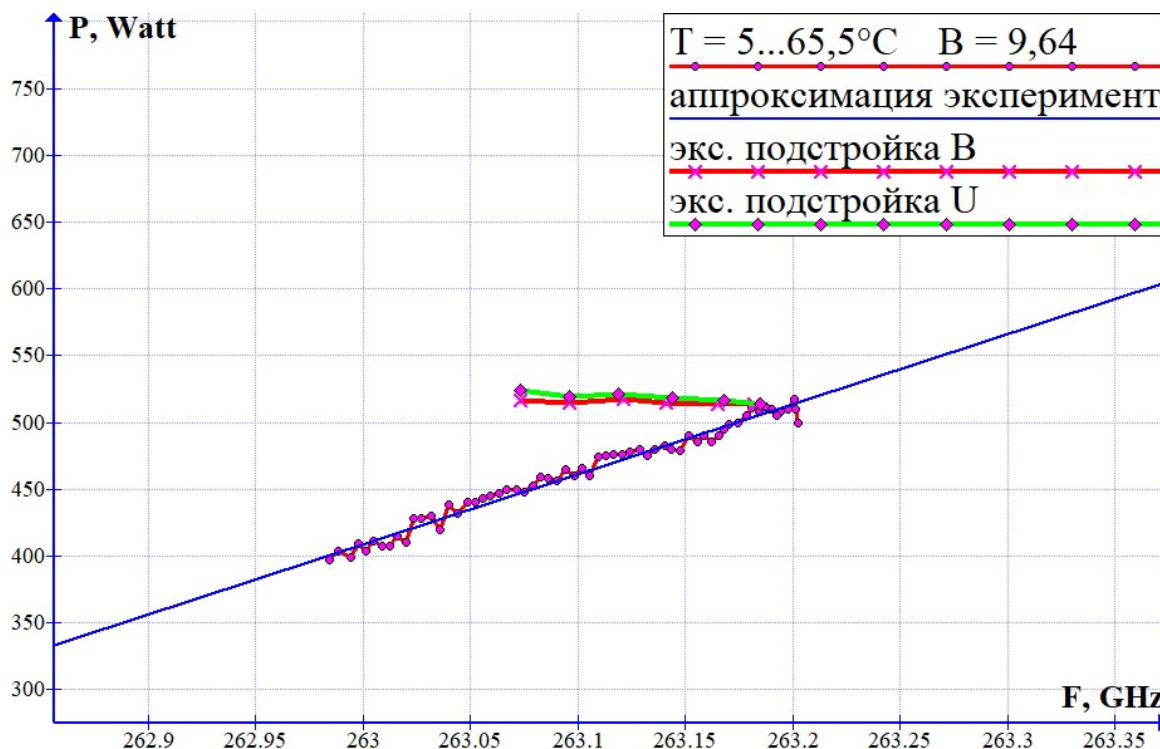
#### 4. Эксперимент с управлением частотой 263 ГГц гиротрона

Другим приложением данных методов стал расчет и экспериментальное исследование гиротрона на частоте 263 ГГц, работающего на основной циклотронной гармонике.

За время эксплуатации данного прибора был накоплен достаточно большой объем экспериментальных данных в зависимости от вариации различных управляющих параметров. Общей же задачей данного исследования была организация такого режима работы прибора, при которой происходила бы перестройка выходной частоты при сохранении выходной мощности прибора. С помощью анализа экспериментальных данных и результатов численного моделирования был выбран сценарий, при котором происходила одновременное согласованное изменение двух управляющих параметров.

Результаты эксперимента представлены на рис. 2. Синей линией помечена траектория, полученная при изменении температуры охлаждающей жидкости и фиксированном магнитном поле и ее линейная аппроксимация. Красной и зеленой линией помечены режимы с одновременным изменением двух управляющих параметров. Красная - одновременное изменение температуры резонатора и магнитного поля основного соленоида. Синяя - одновременное изменение температуры резонатора и ускоряющее напряжение

Можно видеть, что оба метода (подстройка магнитного поля и подстройка ускоряющего напряжения) действительно обеспечивают стабилизацию выходной мощности с хорошим уровнем точности.



**Рисунок 2.** Результаты эксперимента на 263 ГГц гиротроне в сравнении с данными прежних экспериментов и их аппроксимацией

В перспективе используя чиллер с лучшими характеристиками, а также другие охлаждающие жидкости можно существенно расширить (до нескольких раз) диапазон используемых температур и соответственно диапазон перестройки частот гиротронов данным методом.

Важным вопросом является также характерные времена, используемые в эксперименте. В условиях данного эксперимента время установления необходимой температуры имеют порядок нескольких минут, в то время как установление ускоряющего напряжения менее секунды, а магнитного поля – несколько секунд.

Таким образом, если необходима быстрая перестройка мощности и частоты необходимо выбирать другие управляющие параметры, однако диапазон возможной перестройки частоты при этом может быть существенно ниже.

## 5. Заключение

В результате проведённых исследований на пример двух гиротронов средней мощности работающих на различных гармониках циклотронной частоты показаны возможности стабилизации и управления выходными параметрами данных приборов

Работа выполнена при поддержке госзадания ИПФ РАН (проекты № 0030-2021-0001, № 0030-2021-0008).

### Список литературы

1. М. Глявин, Г. Денисов, В. Запезалов, А. Куфтин, А. Лучинин, В. Мануилов, М. Морозкин, А. Седов, А. Чирков, (2014). Терагерцевые гиротроны: состояние и перспективы. Радиотехника и электроника. 59. 745-751.
2. G. S. Nusinovich, M. K. A. Thumm, and M. I. Petelin, "The gyrotron at 50: Historical overview," J. Infr., Millim., THz Waves, vol. 35, no. 4, pp. 325–381
3. A.Litvak, G.Denisov, M.Glyavin. Russian gyrotrons: achievements and trends. IEEE Journal of Microwaves, 1,1, 260-268 (2021)

4. Семенов Е.С., Зуев А.С. САМОСОГЛАСОВАННЫЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОН-ВОЛНОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В РЕЗОНАТОРЕ ГИРОТРОНА В сборнике: Сборник материалов международной конференции КРОМШ-2019 "XXX Крымская Осенняя Математическая Школа-симпозиум по спектральным и эволюционным задачам". Сборник материалов международной конференции КРОМШ-2019. 2019. С. 275-278.
5. Венедиктов Н.П., Дубров В.В., Запевалов В.Е., Корнишин С.Ю., Котов А.В., Куфтин А.Н., Малыгин О.В., Седов А.С., Фикс А.Ш., Цалолихин В.И. Экспериментальное исследование непрерывного высокостабильного гиротрона на второй гармонике для спектроскопии динамически поляризованных ядер // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 4. С. 260.