

**«Теоретическое и экспериментальное исследование автомодуляционных режимов генерации в приборах гирорезонансного типа»**

По специальности 01.04.03 – «радиофизика»

Диссертация Р.М. Розенталя, как следует из названия, посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию электронно-волнового взаимодействия в гирорезонансных приборах, работающих в специфических режимах генерации, отличных от режимов генерации классических гиротронов. Сразу скажу, что поскольку я – экспериментатор, а не теоретик, поэтому открыв первую страницу Автореферата и увидев, что руководитель соискателя д.ф.- м.н. И.В. Зотова – «чистый» теоретик, сначала решил: писать отзыв не буду, тем более, что у меня была «запарка» на работе. Однако, в сентябре, ознакомившись с содержанием Автореферата, изменил своё решение после того, как прочитал на стр.8 в разделе «Положения, выносимые на защиту» три магических слова «нелинейная флюктуирующая задержка».

Как я и предполагал, основной материал диссертации посвящён теоретическим исследованиям (2.5 Главы к 0.5 Главы). В этой связи, на выводы, сделанные диссертантом по результатам моделирования, и оценке их адекватности рассматриваемым процессам электронно-волнового взаимодействия, когда они не проверены в эксперименте, я полностью полагаюсь на мнение руководителя диссертанта д.ф.- м.н. И.В. Зотову и консультанта профессора Н.С. Гинзбурга. Но общую канву этих исследований, их внутреннюю логическую связь и направленность проследить и оценить несложно.

Глава 1 диссертация Р.М. Розенталя, как следует из Автореферата, посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию электронно-волнового взаимодействия в гиротронах и в гиро - ЛОВ с **внешними отражениями**, работающих соответственно на первой, и на второй гармониках циклотронной частоты. В разделе 1.1 сформулированы положения нестационарной самосогласованной модели, которая была использована как в первой, так и с некоторыми модификациями в последующих главах диссертации для теоретического анализа динамики гироприборов.

Особенностью модели по сравнению с используемыми ранее нестационарными моделями гиротрона является учёт в уравнениях движения частиц *частной производной по времени  $d/dt$* , ответственной за конечность времени пролёта электронов через пространство взаимодействия и, соответственно, за **реальный** наклон дисперсионной характеристики электронного потока. Указанный фактор имеет принципиальное значение для корректного описания возможности реализации широкополосной генерации при большой надкритичности, о режимах генерации при которой проведено детально рассмотрение в Главе 2. Таким образом, именно эта «**основная модель**» является основой построения картины электронно-волнового взаимодействия почти во всех рассмотренных в диссертации различных вариантах генераторов на основе гироприборов.

Кроме того, в этой Главе 1 был проведен анализ спектра собственных мод электродинамической системы гиротрона с учётом отражения от диафрагмы. Выяснены условия возбуждения соседних продольных мод, которые приводят к периодической авто - модуляции частоты. При этом частотой авто-модуляции можно управлять за счёт изменения положения отражателя. Это продемонстрировано на основе моделирования усреднённых уравнений «**основной модели**» и прямого численного моделирования методом крупных частиц KARAT (PIC KARAT).

Вторая часть Главы 1 посвящена экспериментальным исследованиям. В разделе 1.2.1 (в Автореферате не обозначен) проведен эксперимент на стенде непрерывного гиротрона при переходе в режим возбуждения моды  $TE_{12}$  на частоте 21ГГц, когда выходное окно становилось рассогласованным. Были зарегистрированы устойчивые



режимы авто-модуляции с частотой  $54+0.5\text{МГц}$ , что близко расчётному значению в  $60\text{МГц}$ . В разделе 1.2.2 (в Автореферате 1.2.1) приведены результаты экспериментов по исследованию влияния отражений на динамику релятивистского гиротрона с частотой  $\approx 35\text{ ГГц}$  и рабочей модой  $\text{TE}_{33}$  в условиях изменения расстояния до отражателя брегговского типа. Были зарегистрированы две области генерации периодически модулированного излучения с уровнем мощности  $0.2-0.4\text{ МВт}$  и частотами модуляции  $(23-32)+1\text{МГц}$  и  $(66-73)+1\text{МГц}$ . Определены номера продольных мод, ответственных за эти частоты авто-модуляции. В совокупности полученные данные демонстрируют возможность управления частотой авто-модуляции в гиротронах путём изменения положения отражателя.

В разделе 1.2.3 представлены результаты экспериментальных исследований нетрадиционных, авто-модуляционных режимов генерации в релятивистском гиротроне, работающем на моде  $\text{TE}_{01}$ , с частотой  $9\text{ГГц}$ . Эти режимы наблюдались при наличии в СВЧ - тракте отражателя. При этом отражатель размещался в вакуумном объёме для предотвращения ВЧ пробоев. В эксперименте по мере увеличения тока пучка наблюдались режимы как периодической, так и хаотической авто-модуляции. Максимальная выходная мощность в режиме хаотической авто-модуляции достигала  $1.6\text{МВт}$ , а КПД был около  $8\%$ . Однако спектр сигнала имел вид мощной несущей с шумовой модуляцией на много меньшего уровня.

В разделе 1.3 исследовалась возможность снижения бифуркационных значений токов и реализации хаотических режимов генерации при введении умеренных отражений в гиро - ЛОВ. Теоретический анализ проводился на основе упрощённой модели, учитывающей только обратную волну. Экспериментальные исследования выполнялись на стенде импульсного  $24\text{ГГц}$  гиротрона с рабочей модой  $\text{TE}_{11}$ , возбуждаемой на второй гармонике гиро - частоты.

Впервые при установке внешнего отражателя в приборах этого типа получены режимы периодической и хаотической генерации с глубиной модуляции до  $100\%$  и уровнем мощности  $\approx 100\text{Вт}$ .

Поскольку результаты экспериментальных исследований представлены только в Главе 1, то имеет смысл провести сразу их оценку. Прежде всего, тот факт, что теоретик решил проверять результаты своих моделей в эксперименте, уже само по себе заслуживает положительной оценки. А то, что при этом ему необходимо было убедить экспериментаторов в целесообразности таких экспериментов, причём на нескольких стендах, а затем и принимать в них самое активное участие, только добавляет эпитет «высокая» к этой оценке.

Следует положительно оценить и выбор объектов для экспериментов, позволяющих наиболее просто проверить выводы теоретического исследования по возможности существования авто - модуляционных режимов работы гиротрона. Как известно, генерация хаотических и многочастотных колебаний возможна в усилителях с продольным взаимодействием, охваченных внешней задержанной обратной связью. В генераторах, таких как гиротрон или обычная ЛОВ с фиксированной длиной пространства взаимодействия, аналогом внешней задержанной обратной связью могут быть только либо внутренние отражения из-за рассогласования вывода энергии, или выходной СВЧ тракт с отражателем. Поэтому в разделах 1.2.1 и 1.2.2 используется и тот и другой варианты. В обоих случаях результаты экспериментов подтверждают результаты расчётов по возбуждению периодической авто-модуляции. И это замечательно, потому что выяснена физическая природа этого явления! Но вот вывод о том, что можно управлять частотой авто-модуляции изменением положения отражателя, мне представляется очевидным и, более того, бесполезным, так как авто-модуляция не даёт возможности получить оптимальные параметры одной из конкурирующих продольных мод, и от неё следует избавляться. Что касается экспериментов раздела 1.2.3 с релятивистским гиротроном с частотой  $9\text{ГГц}$ , то это, действительно, новый важный результат, показывающий



возможность получения хаотической авто - модуляции большой мощности в узкополосной системе, состоящей из генератора с отражателем. То же можно сказать и об экспериментах с gyro – ЛОВ.

В целом экспериментальная часть работы, безусловно, заслуживает высокой оценки.

В Главе 2 проведено теоретическое исследование возможности существенного расширения полосы шумового излучения в гиротронах в условиях большой над критичности. Результаты, полученные в этой главе, представляются мне наиболее интересными, как с точки зрения развития теории электроно-волнового взаимодействия в гиротронах в таких режимах, так и с точки зрения перспектив их использования.

В основу этого исследования положена идея возбуждения одновременно низкочастотного В и высокочастотного А циклотронных резонансов, когда они достаточно далеко разнесены по частоте при пересечении дисперсионной характеристики волны линией пучка. В разделе 2.1 выполнено моделирование в рамках усреднённого подхода, которое показало, что с ростом параметра тока  $I_0$  при определённых условиях происходит перекрытие зон генерации, соответствующих резонансным точкам А и В. В результате имеет место формирование шумового сигнала с практически равномерным спектром с шириной, близкой к разности частот в точках А и В. Подчёркивается, что без учёта временной производной в «основной модели» возможна только одна точка пересечения дисперсионных характеристик.

Проведена оценка возможности реализации такого режима в слаборелятивистском гиротроне вблизи частоты 35 ГГц при взаимодействии с рабочей волной  $TE_{11}$  на первой гармонике гирочастоты. Показано, что ширина спектра хаотической генерации может достигать 10%. Кроме того, указывается, что такой режим может быть реализован и в высших гармониках гирочастоты. Приведены результаты оценки ширины спектра генерации для одного из вариантов гиротрона при рабочем магнитном поле 4-4.5Тл. Ширины спектра вблизи частот 120, 240, 360ГГц таковы: на моде  $TE_{11}$  на первой гармонике -18ГГц, на моде  $TE_{21}$  на второй - 13.5ГГц, на моде  $TE_{31}$  на третьей гармонике гирочастоты - 2.3ГГц. Полученные результаты были подтверждены также на основе моделирования с использованием PIC KARAT. (см.п.2.1.2, которого в Автореферате нет, как и п.2.1.1).

Было выяснено, что в этом режиме при больших значениях токового параметра  $I_0$  излучение представляет собой последовательность ультракоротких импульсов с длительностью обратно пропорциональной разности частот в точках А и В с пиковой мощностью, в десятки раз превосходящей фоновый уровень излучения («аналог волн-убийц»). Поэтому была проведена большая работа по созданию адекватной теоретической модели для описания этого явления. В результате была выяснена необходимость модификации «основной модели» посредством учёта изменения продольного импульса электронов.

В разделе 2.2 было проведено моделирование динамики гиротрона на основе модифицированной «основной модели» с учётом изменения продольного импульса электронов, что позволило проанализировать механизм образования «волн-убийц».

В Главе 3 теоретически исследована возможность генерации излучения миллиметрового диапазона на основе gyroусилителей: гироклистрона и gyro – ЛБВ с рабочим пространством в виде волновода с винтовой многозаходной гофрировкой («винтовой» gyro – ЛБВ).

В разделе 3.1.1 рассмотрено электроно-волновое взаимодействие в гироклистроне с параметрами, ранее исследованного экспериментально gyro- клистрона с рабочей частотой 93 ГГц, на базе «основной модели». Результаты теоретического рассмотрения находятся в хорошем соответствии с экспериментальными результатами.

В разделе 3.1.2 проведено теоретическое рассмотрение генератора на основе (по-видимому, этого же) gyro - клистрона с внешней задержанной обратной связью. Для моделирования использовалась та же «основная модель», потому что она позволяет адекватно описывать авто - модуляционные режимы генератора различной сложности. Исследован сценарий перехода к хаосу и продемонстрирована возможность генерации шумового излучения с мощностью в десятки киловатт и относительной шириной спектра около 1%, т.е. около 0.93 ГГц.

В разделе 3.2. проведено теоретическое исследование генератора хаотических колебаний на основе «винтовой» gyro – ЛБВ, так как она обладает 10% полосой усиления, и, следовательно, в случае создания такой ЛБВ 3мм диапазона, генератор на её основе будет иметь ширину спектра около 9.3 ГГц.

Поэтому в разделе 3.2.1 проведено теоретическое исследование динамики «винтовых» gyro – ЛБВ при введении запаздывающей обратной связи (ЗОС). Построена адекватная теоретическая модель, учитывающая формирования специфической дисперсионной характеристики gyro - ЛБВ, с использованием усредненных уравнений движения «основной модели». Наличие обратной связи учтено при записи граничных условий для бегущей волны, для квазикритической волны использованы стандартные граничные условия. В численном моделировании, в том числе с использованием PIS KAPAT (п.3.2.2), было продемонстрировано, что для экспериментально реализованной gyro - ЛБВ с рабочей частотой около 35 ГГц могут быть реализованы режимы шумовой генерации с шириной спектра 3-4 ГГц, соответствующей её полосе усиления в 10%, и средней мощностью 50-70 кВт.

В разделе 3.2.3 предлагается для улучшения неравномерности спектральной характеристики генератора с ЗОС ввести в неё дополнительный элемент с резкой зависимостью набега фазы колебаний на длине пространства взаимодействия от амплитуды, т.е. ЗОС становится **нелинейной флюктуирующей задержкой**. Предлагается техническое решение для реализации этого элемента.

Кроме того, в Приложении 2 диссертант рассмотрел теоретически с использованием его математических моделей процессы в такой системе, состоящей из двух черенковских ЛБВ. Это как раз то, что до настоящего времени не было сделано.

#### **Недостатки.**

В Главе 1 отсутствует раздел 1.2.2, так как диссертант забыл обозначить п.1.2.1 работу на стенде непрерывного технологического гиротрона с частотой 21 ГГц.

В той же Главе 1 не приведен спектр генерируемого сигнала для gyro – ЛОВ.

В Главе 2 при оценке ширины спектра для гармоник gyro- частоты можно только догадываться о ходе для них дисперсионных характеристик волны.

В Главе 3 автор отправляет читателя сначала к п.3.2.2, а затем к п.3.2.3, которые отсутствуют в Автореферате.

Существуют ошибки в тексте на стр.14,15,16.

Подводя итог моего многостраничного «исследования» Автореферата (объём проведенных исследований этого требовал) я считаю, что диссертация Р.М. Розенталя посвящена актуальной проблеме, а именно, исследованию возможности генерации хаотического излучения на основе gyro – приборов, для увеличения его мощности в миллиметровом диапазоне волн.

**Несмотря на указанные недостатки, работа производит самое благоприятное впечатление, а соискатель, безусловно, заслуживает искомой степени кандидата физико-математических наук.**

В заключение хочу поблагодарить диссертанта за три «магических» слова. Их упоминание перенесло меня на 52 года назад в 1966 год. Именно в этом году я - м. н. с. ИРЭ АН СССР собрал схему генератора из двух ламп, исследовал её поведение, понял, что генерация широкополосного шумового сигнала однозначно связана с сильно нелинейным режимом одной из них. Я измерил амплитудные характеристики на разных



частотах, установил, что при генерации шума рабочая точка лежит на её падающем участке и пошёл с докладом к шефу – В.Я.Кислову. Что тут началось, трудно описать словами. Как это могла быть нарушена теорема единственности. Академики не верили. Как объяснить? И, наконец, объяснили нелинейным набегом фазы в ЛБВ - нелинейном элементе. Где взять теорию на этот счёт? К счастью, в ИРЭ находился с визитом американский теоретик Дж. Роу с презентацией своей книги. Вот в ней-то и нашёлся нужный график искомой зависимости. Так этот генератор и стал называться генератором с **нелинейной флюктуирующей задержкой**. Уже значительно позднее он стал называться шумотроном.

Что касается технических решений, то для вашего предложения нужно выбирать ЛБВ – усилитель с большим усилением и большой мощностью, тогда в качестве нелинейного элемента можно взять маломощную ЛБВ, что позволяет с выхода мощной лампы отбирать небольшую долю её выходной мощности. Это, во-первых, а во-вторых, можно сделать этот генератор с усилителем и нелинейным элементом в одном вакуумном объёме. Этот вариант уже приведен на Рис.6 Автореферата. Просто нужно сделать ЛБВ двухсекционной, разделив секции пространством дрейфа, вторую секцию сделать длинной, а выход генератора осуществлять с выхода первой секции. Естественно, выход лампы нужно соединить с её входом. Это – так называемый, одно баллонный шумотрон. Все варианты шумотрона представлены в музее ИРЭ и ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

К.т.н., с.н.с., Лауреат Гос. Премии СССР,

Вед.н.с. ФИРЭ им.В.А. Котельникова РАН

Подпись заверяю:

Учёный секретарь ФИРЭ им.В.А. Котельникова РАН

Д.ф.-м.н.

 Мясин Евгений Анатольевич.

 Чучева Галина Викторовна

141190, Российская федерация, Московская обл., г. Фрязино, площадь им. Введенского д.1. Тел. 8- 903-525-5733. E-mail: [irm168@ms.ire.rssi.ru](mailto:irm168@ms.ire.rssi.ru)

