

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН
академик РАН

С.А.Никитов

«19» 05 2024

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской
академии наук (ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН)
на диссертационную работу

Новожиловой Юлии Владимировны

«ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И СТАБИЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ МОЩНЫХ ГИРОТРОНОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНЕШНЕГО СИГНАЛА»

представленную на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальности 1.3.4 – радиофизика

Диссертация посвящена исследованию актуальной проблемы в области разработки гиротронов – влиянию электромагнитного колебания, поступающего извне в гиротрон, на его режим работы. Несмотря на большое количество проводившихся в последние десятилетия исследований гиротронов, это направление для мощных гиротронов миллиметрового и субмиллиметрового диапазона с большим числом взаимодействующих мод было исследовано недостаточно. Такие исследования являются важными для многочисленных приложений, связанных с нагревом и диагностикой плазмы, а также в перспективе для создания комплексов когерентно излучающих гиротронов, которые, в свою очередь, могут быть использованы при беспроводной передаче энергии, управлении токами в токамаках и стеллараторах, и формировании полей большой напряженности в терагерцовых ускорителях.

К достоинствам диссертации следует отнести общий взгляд диссертанта на исследуемые процессы и выявление общих черт физических явлений, происходящих при стабилизации частоты автогенератора под воздействием как квазимонохроматического внешнего сигнала, так и отраженной узкополосной волны. Качественные и аналитические рассуждения подтверждаются численными результатами и данными экспериментов, что позволяет сделать вывод об обоснованности научных положений и заключений, а также о достоверности полученных результатов.

Диссертация состоит из Введения, пяти глав и Заключения. **Введение** содержит подробное описание актуальности тематики, степень ее разработанности в трудах предшественников, целей диссертации, научной новизны, апробации результатов, личного вклада автора, обоснование достоверности полученных результатов.

Первая глава содержит вывод уравнения возбуждения поля рабочей моды резонатора гиротрона, в который поступает волна из сопряженного выходного волновода. Уравнение получено в приближении фиксированной продольной структуры поля, что справедливо при достаточно высокой добротности резонатора гиротрона. При этом использован метод возмущений, аналогичный описанию омических потерь в случае сильного скин-эффекта, когда электрическое поле на стенке резонатора в первом приближении удовлетворяет граничному условию Леонтовича в предположении, что магнитное поле на стенке совпадает с полем нулевого приближения, то есть полем закрытого резонатора с идеально проводящими стенками. В диссертации подобным образом рассмотрены дифракционные потери и воздействие внешней волны, что позволило получить уравнение возбуждения при произвольной мощности входного сигнала, в том числе сравнимой с мощностью излучения, тогда как в работах предшественников было феноменологически, без вывода, приведено уравнение для случая малой входной мощности. На основе приведенных в данной главе уравнений гиротрона, рассмотрены все задачи в последующих главах. Кроме того, в первой главе предложена оптимизация алгоритма численного моделирования, позволяющая сократить время расчетов.

Вторая глава посвящена исследованию захвата частоты мощных гиротронов внешним монохроматическим сигналом. Показано, что при продвижении в субмиллиметровый диапазон увеличение амплитуды рабочей моды под воздействием внешнего сигнала позволяет подавить паразитные моды и получить мегаваттный уровень мощности излучения, что невозможно в отсутствие внешнего сигнала. При этом относительная мощность внешнего сигнала может составлять лишь несколько процентов. Высокий уровень мощности генерации в режиме захвата сохраняется при учете разброса параметров электронного пучка – при конечной толщине пучка до $1/3$ длины волны, перекосе или смещении оси пучка относительно оси резонатора гиротрона до $1/4$ длины волны, а также в случае разброса поперечных скоростей электронов до 40%. Такой разброс параметров электронного пучка соответствует реальной экспериментальной ситуации. Показано, что при низкочастотных флуктуациях напряжения до 0.2% в случае захвата частоты гиротрона внешним сигналом вариации частоты и фазы излучения снижаются, вариации фазы составляют для реальных параметров гиротронов несколько градусов, что допустимо при создании в перспективе комплекса когерентно излучающих источников.

Проведенные исследования легли в основу экспериментов по захвату частоты гиротронов 35ГГц/900кВт и 170ГГц/МВт внешним сигналом. Показано хорошее согласие расчетных и экспериментальных результатов.

В **третьей главе** рассмотрено воздействие внешнего сигнала с амплитудной или частотной модуляцией на режимы работы гиротрона. Такое исследование представляется важным для нахождения приемлемых вариаций параметров управляющего гиротрона-драйвера, а также для плазменных экспериментов по формированию ионных волн плазмы при воздействии излучения гиротронов. Показано, что если ширина спектра внешнего сигнала много уже ширины полосы захвата монохроматическим сигналом, и биения амплитуды внешнего сигнала не слишком глубокие, то происходит захват частоты гиротрона таким сигналом, при этом параметры гиротрона отслеживают изменения параметров внешнего сигнала.

Четвертая глава посвящена исследованию режимов генерации гиротрона при воздействии отражения от удаленной нерезонансной нагрузки. Показано, что при большом запаздывании существует несколько стационарных состояний гиротрона, каждому из которых соответствует определенная частота и амплитуда. В этом случае частота стабилизирована и меняется в существенно меньшем интервале при изменении параметров гиротрона или отражателя до тех пор, пока сохраняется продольная структура поля в линии запаздывания. Изменение числа продольных вариаций поля в линии запаздывания приводит к скачку амплитуды и частоты генерации, при этом имеет место гистерезис, то есть характер изменения частоты и амплитуды излучения отличается при возрастании и убывании какого-либо параметра системы. Показано, что стабильные по частоте состояния равновесия могут быть устойчивы относительно роста возмущений амплитуды и относительно возбуждения двух симметрично отстоящих боковых сателлитов.

В **пятой главе** рассмотрена возможность стабилизации частоты при воздействии запаздывающего отражения от внешнего высокодобротного резонатора. Следует отметить, что несмотря на то, что такой способ стабилизации частоты активно используется в лазерах и СВЧ генераторах других типов (магнетронах и клистродах), теоретическое рассмотрение в работах предшественников проводилось только на основе уравнений конкретных оптических систем или эквивалентных радиотехнических схем. Общий подход на основе уравнений связанных колебаний генератора и внешнего колебательного контура был развит только для случая нулевого запаздывания, неоптимального для стабилизации частоты. В диссертации представлен общий анализ генератора с запаздывающим отражением от внешнего высокодобротного резонатора, применимый к генераторам различного типа. При этом аналитически показана возможность стабилизации частоты и определены условия

устойчивости стабилизированных по частоте состояний равновесия. Теоретические результаты находятся в полном соответствии с результатами первого эксперимента по стабилизации частоты технологического 28 ГГц гиротрона отражением от внешнего квазиоптического резонатора, выполненного при соавторстве диссертанта.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации, наиболее важные из которых, на наш взгляд, заключаются в следующем.

- Выведены уравнения возбуждения полей гиротрона, в резонатор которого из сопряженного выходного волновода поступает внешний квазимонохроматический сигнал или отраженная от удаленной нагрузки волна.
- Показано, что в результате подавления паразитных мод при фазовом захвате возможно существенное повышение мощности и КПД гиротрона, увеличение в несколько раз ширины полосы перестройки частоты излучения. Показано, что вне зоны генерации рабочей моды воздействие внешнего сигнала существенно меняет характер взаимодействия мод.
- Теоретически показано, что частота излучения гиротрона может быть стабилизирована под воздействием слабого отражения от удаленной нерезонансной нагрузки и от внешнего высокочастотного резонатора. Определены условия устойчивости состояний равновесия.
- Полученные теоретические результаты были использованы при планировании и проведении экспериментальных исследований захвата частоты гиротронов мегаваттного уровня мощности и стабилизации частоты технологического гиротрона отраженной волной. Показано, что экспериментальные и теоретические результаты хорошо согласуются.

Не вызывает сомнений научная новизна и высокая практическая значимость полученных результатов. Все положения, выносимые на защиту, подтверждаются результатами диссертации. Личный вклад диссертанта подробно описан во Введении. Все основные теоретические результаты получены автором лично. В экспериментах вклад автора состоял в определении основных параметров эксперимента, интерпретации полученных данных и сопоставлении их с результатами теоретического анализа.

Диссертация представляет собой целостную и завершенную научную работу, выполненную самостоятельно на высоком уровне, и вносит значительный теоретический вклад в теорию многомодовых автогенераторов с внешним сигналом и запаздывающей отраженной волной. Основные результаты опубликованы в 44 статьях в рецензируемых российских и зарубежных журналах по данной тематике, входящих в перечень ВАК, а также

докладывались на многочисленных российских и международных семинарах, конференциях и школах, в том числе в виде ключевого доклада и лекций, что подтверждает достоверность полученных результатов.

Автореферат отражает основное содержание и результаты диссертации.

Диссертация не свободна от некоторых недостатков, основным из которых является верификация использованного математического аппарата. Именно, анализ физических процессов в giroприборах проводится с помощью чрезмерно упрощенной модели, работоспособность которой при численных расчетах следовало бы более детально проверить с помощью, например, кого-либо варианта PIC-кода. Особенно это касается анализа перестройки модового состава приборов при воздействии внешним сигналом. В этом смысле, просто ссылки на выполненные расчеты с использованием программы «Карат» (стр. 207 рукописи) недостаточно. Автор рассматривает возникающие явления на уровне физического анализа, что не всегда может привести к успеху ввиду сложности системы и, тем более, может усложнить поиск новых процессов. В диссертации хотелось бы увидеть более четкую формулировку границ применимости использованной математической модели.

Другим недостатком работы является излишне беглый литературный анализ проблемы синхронизации, известной со времен Х. Гюйгенса. В частности, в списке литературы отсутствует ссылка на классическую работу К.Ф. Теодорчика.

Несмотря на сделанные замечания научный уровень и значимость диссертации достаточно высоки. Диссертационная работа Новожиловой Юлии Владимировны «Повышение эффективности и стабилизация частоты мощных гиротронов при воздействии внешнего сигнала» соответствует всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемых ВАК, утвержденным Постановлением правительства № 842 от 24 сентября 2013 г. (действует с 01.01.2014 г.) с точки зрения актуальности, новизны, достоверности, практической значимости и личного вклада диссертанта, а ее автор Новожилова Ю.В. безусловно заслуживает присвоения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.4 «радиофизика».

Диссертация и отзыв о ней обсуждены и одобрены на заседании научно-квалификационного семинара «Генерация электромагнитных колебаний и их применения» Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН

Председатель семинара
Главный научный сотрудник
академик РАН



В.А. Черепенин