

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

### **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**

**Актуальность темы диссертации** определяется важностью исследуемых задач для практических приложений и реализуемостью предложенных методов. Для ряда приложений, таких как диагностика плазмы, управление токами в больших установках управляемого термоядерного синтеза, подавление плазменных неустойчивостей, а также различных технологических экспериментов необходимы источники излучения со стабильной частотой мегаваттного уровня мощности излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах. В качестве мощных источников излучения используются гиротроны, однако в указанных диапазонах частота генерации может быть весьма нестабильна. Более того, при продвижении в субмиллиметровую область длин волн мегаваттный уровень мощности оказывается недостижим в гиротронах из-за возбуждения паразитных мод. Чтобы преодолеть отмеченные препятствия к достижению стабильной генерации с мегаваттной мощностью в обсуждаемых диапазонах частот, в диссертации предлагается воздействовать на режим генерации гиротрона путём подачи электромагнитной волны небольшой амплитуды в область взаимодействия электронного пучка с электромагнитными колебаниями. Такая дополнительная волна может поступать от другого генератора со стабильной частотой, либо её роль может выполнять волна, отражённая из потока излучения, генерируемого данным гиротроном. Этот новый метод стабилизации режима генерации имеет ряд преимуществ по сравнению с известными способами: фазовой автоподстройкой напряжения в источнике электронного пучка (для стабилизации частоты) и применением специальных сценариев включения гиротрона (для подавления паразитных мод). Захват частоты генерации гиротрона внешним сигналом, узкополосным по сравнению с шириной полосы излучения этого прибора в режиме свободной генерации на рабочей моде, позволяет устранить оба указанные выше препятствия на пути повышения мощности в отмеченных диапазонах, а именно: стабилизировать частоту и подавить паразитные моды, что приводит к повышению мощности генерируемого потока излучения. Это открывает возможность достижения мегаваттного

уровня мощности даже при переходе в область субмиллиметровых длин волн. Более того, в условиях захвата частоты генерации нескольких мощных гиротронов волной, поступающей от единичного гиротрона-драйвера, открывается перспектива создания комплекса когерентно излучающих источников, что важно для различных приложений.

Реализация захвата частоты генерации гиротрона подачей электромагнитной волны от другого источника излучения, либо стабилизация частоты генерации поступлением отраженной волны из генерируемого потока стала возможна после разработки двухканального квазиоптического преобразователя, позволяющего осуществить ввод внешнего или отраженного сигнала в пространство взаимодействия гиротрона в виде рабочей моды. Таким образом, тема диссертации является актуальной.

**Содержание диссертации. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.** Диссертация состоит из Введения, пяти глав, Заключения, списка публикаций автора и списка цитированной литературы. Во Введении отражены актуальность и степень разработанности темы, методы исследования, цели диссертационной работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, достоверность полученных результатов, апробация работы, личный вклад автора и положения, выносимые на защиту.

В Первой главе приведены основные уравнения, описывающие в гиротроне процессы взаимодействия электронного пучка с электромагнитными волнами. Уравнение возбуждения поля рабочей моды выведено из волнового уравнения в приближении фиксированной продольной структуры поля, справедливом при достаточно высокой добротности резонатора гиротрона. В отличие от более ранних работ других авторов, где уравнение возбуждения приведено для малых мощностей внешнего сигнала по сравнению с мощностью излучения, в диссертационной работе это уравнение получено при произвольной мощности внешнего сигнала, в том числе сравнимой с мощностью излучения. Предложена оптимизация алгоритмов численного моделирования, позволяющая существенно сократить время численных расчетов в случае, когда во взаимодействии участвуют моды с направлением вращения вращением полей, встречным к направлению вращения полей рабочей моды.

Во Второй главе рассмотрены основные преимущества режима захвата частоты гиротрона внешним монохроматическим сигналом по сравнению с режимом свободной генерации этого прибора. Рассмотрение проведено на примере двух гиротронов, один из которых разработан в ИПФ РАН в качестве прототипа гиротрона для ITER с рабочей модой TE<sub>28.12</sub> на частоте 170 ГГц при мегаваттном уровне мощности. В качестве второго примера рассмотрен гипотетический гиротрон на удвоенную частоту 345 ГГц и, соответственно, с удвоенными индексами рабочей моды TE<sub>56.24</sub>. Установлено, что в соответствии с одним из

положений диссертации, воздействие внешнего сигнала полностью меняет картину взаимодействия мод. Так при воздействии внешним сигналом с малой относительной мощностью (4-7 % от генерируемой гиротроном) зоны захвата частоты смещаются в область оптимальных значений ведущего магнитного поля, что позволяет достичь более высоких мощностей излучения, а в случае субмиллиметрового диапазона длин волн повысить мощность генерации почти вдвое. Установлено, что при воздействии внешнего сигнала ширина перестройки частоты генерации гиротрона увеличивается в несколько раз по сравнению с его режимом свободной генерации. Выход из зоны захвата при возрастании тока в центре зоны захвата может сопровождаться возбуждением двух мод эквидистантного спектра, симметричных по частоте относительно рабочей моды, что является аналогом четырехфотонного взаимодействия в оптике. В свободном гиротроне такой параметрический распад может быть достигнут только при очень больших токах.

Показано, что при малых низкочастотных шумах ускоряющего электронного пучка напряжения, флуктуации фазы излучения при захвате частоты внешним сигналом снижаются на порядок по сравнению с их величиной в режиме свободной генерации и становятся приемлемыми для создания в будущем комплекса когерентно излучающих гиротронов. Даже в случае пучка со значительным разбросом поперечных скоростей и ненулевой его толщиной, а также при несоосности пучка и резонатора гиротрона преимущества режима захвата частоты внешним сигналом сохраняются. Так оказалось, что высокая мощность излучения достижима и при относительном разбросе поперечных скоростей электронов до 40%, при толщине пучка и смещении траектории ведущих центров электронных орбит от окружности, идеально соосной с резонатором, на величину порядка  $\frac{1}{4}$  длины волны.

Показано, что теоретические результаты находятся в хорошем соответствии с результатами экспериментов по захвату частоты гиротронов с параметрами излучения 0.9МВт/35ГГц и 1.1МВт/170ГГц.

Третья глава посвящена исследованию управления параметрами гиротрона при воздействии внешнего сигнала с промодулированными частотой или амплитудой. Такая задача представляет интерес для возможных применений гиротрона с внешним квазимонохроматическим сигналом в плазменных экспериментах, а также для определения допустимого разброса параметров излучения гиротрона-драйвера. Показано, что при достаточно малой глубине модуляции параметров внешнего сигнала возможен захват частоты гиротрона, при этом изменения частоты и амплитуды излучения повторяют колебания параметров внешнего сигнала.

В Четвертой и Пятой главах показана возможность стабилизации частоты гиротрона при воздействии волны, которая возникает из генерируемого потока при его отражении от

нерезонансной (4 Глава) и резонансной (5 глава) нагрузки. Часть результатов получена аналитически и находится в полном согласии с результатами численного моделирования. В свою очередь, сопоставление теоретических результатов с данными экспериментов, полученными на технологическом гиротроне, работающем на частоте 28 ГГц, показало их хорошее соответствие в условиях воздействия на режим генерации волной, возникающей при отражении генерируемого потока от нерезонансной нагрузки в виде диафрагмы выходного волновода, а также от внешнего квазиоптического резонатора. Показано, что захват частоты сигналом от внешнего источника излучения и воздействие на режим генерации отраженной волной имеют ряд общих черт, позволяющих стабилизировать частоту излучения гиротрона. Для проведения аналогии между воздействием внешнего и отраженного сигнала в диссертации введено понятие эффективной полосы захвата отраженной волной. Ширина такой полосы генерации совпадает с шириной полосы захвата внешним сигналом, амплитуда которого равна амплитуде отраженной волны.

В Заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Приведенные в диссертационной работе **научные положения, выводы и рекомендации** (в частности, параметры гиротрона и сигнала от внешнего источника, а также параметры отраженной волны, при которых характеристики излучения оптимальны) **обоснованы проведенными теоретическими и экспериментальными исследованиями.**

Все полученные в диссертации результаты, несомненно, обладают **научной новизной**. Так, впервые показана возможность надежного получения мегаваттного уровня мощности излучения гиротрона в субмиллиметровом диапазоне при захвате частоты внешним сигналом относительно небольшой мощности. Впервые проведена аналогия процессов, происходящих при захвате частоты внешним сигналом и при воздействии узкополосной отраженной волны. **Достоверность полученных результатов** подтверждаются хорошим согласованием теоретических и экспериментальных результатов, надежными методами теоретического анализа и математического моделирования, совпадением результатов, полученных аналитически и численно.

Во Введении подробно описан **личный вклад соискателя в разработку научной проблемы**. Все выносимые на защиту положения и результаты диссертации получены автором лично. Вклад диссертанта был определяющим в постановке задач, анализе, интерпретации результатов и написании статей в большинстве теоретических работ, вошедших в диссертацию. В экспериментальных работах по захвату частоты гиротрона внешним сигналом и по стабилизации частоты гиротрона отраженной волной вклад диссертанта заключался в определении основных параметров экспериментов, анализе экспериментальных данных, сопоставлении их с теоретическими результатами.

## **Завершенность диссертации, правильность ее оформления, публикация основных результатов в печати.**

Диссертация является **законченной работой** по данной тематике. Эта работа вносит существенный вклад в развитие теории гиротронов, находящихся под воздействием внешней или отраженной волны. Диссертация **написана ясным и грамотным научным языком**, хорошо оформлена. В то же время следует отметить наличие недочётов в размещении на страницах теста таблиц, сопоставляющих различные данные, и рисунков, представляющих полученные результаты исследований. Положения и результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в 44 научных статьях в журналах, из них 4 статьи в журналах первого квартиля, 9 статей в журналах второго квартиля по базе Scopus, более 20 статей в ведущих российских журналах, специализирующихся на данной тематике. Все статьи проходили рецензирование независимыми российскими и международными экспертами. Результаты докладывались на российских и международных конференциях и школах (в т.ч. в виде ключевого доклада и лекций), обсуждались на различных семинарах (39 докладов).

Автореферат правильно отражает основное содержание и результаты диссертации.

В завершении отзыва остановимся на ряде замечаний, относящихся к содержанию диссертационной работы.

1. В первой главе отмечено, что уравнение возбуждения может быть выведено путем введения некоторого фиктивного источника в выходном сечении. Однако подробный вывод сделан на основе граничных условий, а не из уравнения возбуждения заданным фиктивным источником. На мой взгляд, вывод уравнения возбуждения данным фиктивным источником был бы также целесообразен.
2. Во второй главе влияние неидеальных характеристик электронного пучка рассмотрено по отдельности. Однако для практических приложений представляет интерес исследование влияния сразу нескольких факторов, например, разброса скоростей и конечной толщины пучка.
3. В четвёртой главе на Рис. 4.3.2 представлено сопоставление измеренного и расчётного коэффициента отражения моды  $TE_{02}$  от диафрагмы в интервале частот от 27,8 до 28,2 ГГц. Из представленных графиков зависимости этих параметров от частоты видно, что эксперимент даёт результат, существенно отличающийся от расчёта. Однако в тексте не даётся никакого комментария по поводу причины этого несоответствия результатов расчёта и эксперимента.

4. В четвёртой главе для подтверждения приведенных аналитических выводов было бы полезным провести исследование устойчивости относительно роста возмущений амплитуды на основе численного решения характеристического уравнения, тем более что для возмущений в виде боковых сателлитов исходного состояния такое исследование выполнено.
5. Исследование стабилизации частоты излучения отражением от внешнего резонатора проведено для одномодовой модели гиротрона. Следовало бы рассмотреть многомодовый гиротрон, а также изучить влияние отражения от достаточно удаленного внешнего резонатора с целью определения параметров, при которых решающую роль играет сильная зависимость отраженной волны от частоты или удаленности отражателя (эффект длинной линии).

Безусловно, приведенные замечания не снижают научной значимости диссертации.

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.), а ее автор Новожилова Ю.В. заслуживает присвоения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.4 «радиофизика».

Выражаю свое согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации.

Официальный оппонент

Аржанников Андрей Васильевич

Профессор, доктор физико-

математических наук, физика плазмы,

Новосибирский государственный

университет,

главный научный сотрудник,

профессор,

Новосибирск, 630090,

ул. Пирогова д. 2

+79139124257,

Arzhannikov48@yandex.ru

Подпись *Аржанников Андрей Васильевич* заверяю  
Специалист Управления кадров НГУ  
*Теп. Н. Н. Кабачинский*  
« 30 » 08 2014 г.



«ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ» отдел  
кадров НГУ