

В диссертационный совет 24.1.238.01  
при ФГБНУ «Федеральный  
исследовательский центр  
Институт прикладной физики  
им. А.В. Гапонова-Грехова  
Российской академии наук»

## 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 – радиопизика

Гиротроны в настоящее время являются наиболее эффективными источниками мощного излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн. Основная область применения мощных гиротронов – это нагрев плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза (УТС), таких как ITER или планируемые к разработке DEMO и TPT. Для ряда плазменных приложений, например управление током в установках УТС или диагностика плазмы, необходимы гиротроны мегаваттного уровня мощности со стабильной частотой и фазой излучения в указанном диапазоне длин волн. Такие гиротроны будут востребованы в перспективе для создания комплекса когерентно излучающих мощных генераторов. Однако конкуренция мод в резонаторах мощных гиротронов, нестабильность источников питания, а также уход частоты в процессе генерации из-за провисания потенциала пучка затрудняют достижение этих целей. Воздействие узкополосного внешнего или отраженного сигнала позволяет стабилизировать частоту и одновременно подавить паразитные моды, тем самым повысить мощность излучения за счет продвижения в область оптимальных параметров. Реализация данного метода стала возможна сравнительно

недавно, после создания в ИПФ РАН квазиоптического двухканального преобразователя, обеспечивающего поступление внешнего сигнала в резонатор гиротрона в виде рабочей моды и разделение в пространстве входного и выходного сигналов. В связи с этим диссертационная работа Новожиловой Ю.В., которая посвящена изучению закономерностей работы мощных гиротронов при воздействии внешнего сигнала или волны, отраженной от удаленной нагрузки, представляет собой вполне актуальное исследование и соответствует специальности 1.3.4 – радиофизика.

Диссертация состоит из Введения, пяти глав, Заключения и списка цитированной литературы. Во Введении подробно описаны актуальность и степень разработанности темы диссертации, методы исследования, цели, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, обоснована достоверность результатов, отражен личный вклад автора и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе получены уравнения возбуждения поля рабочей моды в резонаторе гиротрона при наличии внешнего или отраженного сигнала. Использовано приближение фиксированной продольной структуры поля, справедливое при достаточно высокой дифракционной добротности резонатора гиротрона. При этом предполагается, что омические, дифракционные потери и внешний сигнал слабо влияют на структуру поля внутри резонатора. Однако, в отличие от работ предшественников, предположений о малости внешнего сигнала по сравнению с полем излучения не делается. Как показано в диссертации, приближение фиксированной продольной структуры поля оправдано для большинства режимов мощных гиротронов. Преимущества такого подхода связаны с формой записи уравнений гиротрона в полных производных, что позволило получить часть результатов аналитически и сократить время численных расчетов.

Во второй главе исследованы режимы работы мощного гиротрона при воздействии монохроматического внешнего сигнала. Показано, что в результате воздействия даже слабого внешнего сигнала (с относительным уровнем мощности около нескольких процентов) возможно существенное повышение мощности излучения в результате подавления паразитных мод и продвижения в область оптимальных зна-



чений ведущего магнитного поля. Этот эффект наиболее ярко проявляется при возрастании частоты и спектральной плотности мод гиротрона, когда возможно повышение мощности в режиме захвата частоты внешним сигналом вдвое по сравнению с автономным гиротроном. При захвате внешним сигналом возможно существенно увеличить полосу перестройки частоты излучения по сравнению с автономным гиротроном. Эти преимущества режима захвата частоты внешним сигналом сохраняются для гиротрона с неидеальным электронным пучком, для которого учтен скоростной разброс электронов, конечная толщина пучка и возможное смещение или перекося относительно оси резонатора. Исследованы режимы генерации при выходе параметров гиротрона или внешнего сигнала за полосу захвата. Показано, что эти режимы различны для автономного гиротрона и гиротрона с внешним сигналом. Так, в гиротроне с рабочей частотой 170 ГГц при выходе из зоны захвата в области токов выше 70 А могут возбуждаться два боковых сателлита рабочей моды, что можно рассматривать как аналог четырехфотонного распада в оптике. В автономном гиротроне такие режимы наблюдаются только при токах выше 100 А вдали от зоны одномодовой генерации.

В этой же главе проведено сопоставление теоретических результатов с данными экспериментов по воздействию внешнего сигнала на работу мощных гиротронов, проведенных в ИПФ РАН с использованием двухканального квазиоптического преобразователя. Для гиротрона с частотой 35 ГГц получены осциллограммы сигналов и спектры излучения гиротрона и магнетрона, создающего внешний сигнал. Теоретические и экспериментальные временные реализации сигналов и спектры в режиме захвата и биений, возникающих вне зоны захвата, находятся в хорошем соответствии друг с другом. Для гиротрона, созданного в качестве прототипа гиротрона для ITER с рабочей частотой 170 ГГц, при захвате частоты сигналом от внешнего гиротрона-драйвера в теории и эксперименте наблюдалось увеличение мощности на 11 %, расширение полосы генерации на рабочей моде более, чем в два раза. Расчеты также хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Третья глава посвящена исследованию работы гиротронов при воздействии сигналов, отличных от гармонического. Показано, что при небольшой амплитудной и частотной модуляции внешнего сигнала, когда его спектр лежит внутри полосы захвата, происходит захват частоты гиротрона. При этом генерируется рабочая мода,



частота и амплитуда которой "отслеживают" изменения частоты и амплитуды внешнего сигнала. При глубокой модуляции частоты или амплитуды внешнего сигнала наблюдаются биения на рабочей моде или возбуждение соседних мод. Актуальность таких исследований для практики обусловлена важностью определения допустимых вариаций параметров внешнего сигнала, а также возможным применением промодулированного излучения гиротрона для задач плазменной диагностики.

В четвертой главе исследована работа гиротрона при воздействии волны, отраженной от нерезонансной нагрузки. Показано, что в системе, состоящей из гиротрона, линии задержки и нагрузки, может существовать одно (при достаточно малой длине линии задержки) или несколько (в случае большого запаздывания) состояний равновесия. У каждого из этих состояний равновесия зависимость поля от продольной координаты внутри резонатора гиротрона является одnogорбой, а в линии запаздывания – многогорбой. Состояния равновесия различаются числом продольных вариаций поля в линии запаздывания. Если число состояний равновесия больше одного, частота излучения стабилизируется и при небольшом изменении параметров системы меняется в более узком интервале, чем в гиротроне без отражений. Если же параметры системы меняются существенно, происходит гистерезисный скачок амплитуды и частоты излучения в другое состояние равновесия. Проанализирована устойчивость состояний равновесия и показано, что стабилизированные по частоте состояния могут быть устойчивыми. Таким образом, возможна стабилизация частоты отраженной волной при достаточно большой длине линии задержки. Теоретические результаты сопоставлены с экспериментальными данными по влиянию отраженной волны на работу гиротрона с рабочей частотой 28 ГГц. Показано хорошее соответствие теории и эксперимента.

Пятая глава посвящена исследованию возможности стабилизации частоты гиротрона при отражении излучения от внешнего высокодобротного резонатора. Построена общая теория произвольного генератора с отражающей резонансной нагрузкой. Показано, что частота генератора может быть стабилизирована, если частота внешнего резонатора близка к собственной частоте резонатора генератора, отражение возвращается в генератор в фазе с полем генератора и добротность внешнего резонатора существенно выше добротности резонатора генератора. При этом стаби-

лизированные по частоте состояния равновесия системы устойчивы. Результаты теории подтверждены экспериментальными данными для гиротрона с рабочей частотой 28 ГГц с внешним отражающим квазиоптическим резонатором.

В Заключении приведены основные результаты диссертации.

Поставленные в диссертации задачи решены различными методами – аналитическими и численными, а также подтверждены данными экспериментов, что позволяет сделать вывод об обоснованности и достоверности научных положений. Все результаты являются новыми и оригинальными. Хотелось бы особенно подчеркнуть примененный автором общий подход к решению задач о воздействии внешнего и отраженного сигнала на работу гиротрона и проведение аналогии между этими задачами, что является несомненным достоинством диссертации, обеспечивает ее целостность и завершенность и, несомненно, относится к числу ее главных достоинств. Также к числу достоинств относится аналитический способ решения ряда задач, что позволило диссертанту выяснить и обосновать общий характер полученных результатов для подобных систем.

Диссертация написана ясным и грамотным научным языком. Основные результаты диссертации получены автором лично. Личный вклад диссертанта являлся определяющим в получении основных теоретических результатов и написании соответствующих статей. В экспериментальных работах вклад диссертанта заключался в определении основных параметров эксперимента, интерпретации полученных данных и сопоставлении их с теоретическими расчетами и написании большинства статей.

Диссертационная работа является существенным вкладом в развитие теории мощных гиротронов. Все основные результаты диссертации опубликованы в 44 статьях в ведущих российских и зарубежных журналах, входящих в перечень ВАК, прошли независимое рецензирование, а также докладывались на 39 российских и международных конференциях, что также подтверждает достоверность полученных результатов.

Автореферат правильно и достаточно полным образом отражает содержание диссертации.



Отмечу основные замечания и вопросы.

1. В вводной части диссертации приведен список целей и задач этой работы. Следует, на мой взгляд, уточнить, что из этого списка является целью (целями) работы, а что – ее задачами.

2. Во Введении сказано, что проведенное исследование может быть использовано для задач подавления магнитогидродинамических неустойчивостей в плазме. При этом в самой диссертации, как мне кажется, этот вопрос не обсуждается. Целесообразно пояснить, каков механизм подавления неустойчивостей в данном случае и о каких МГД-неустойчивостях конкретно идет речь.

3. При сопоставлении расчетных и экспериментальных данных для 170 ГГц гиротрона (раздел 2.5) сказано, что "различия значений тока ведущего магнитного поля могут быть связаны с провисанием потенциала". Поскольку провисание потенциала пучка, как я понимаю, не учитывалось в расчетах, то аналогичное различие должно было быть и для 35 ГГц гиротрона. Однако для 35 ГГц гиротрона сказано, что "магнитное поле в расчетах принималось равным 1,485 Тл, что лежит в пределах погрешности экспериментального значения". Каково влияние провисания потенциала пучка для 35 ГГц гиротрона?

4. Традиционно в качестве последнего замечания отмечу недостатки в представлении материала диссертационной работы.

– В вводной части диссертации имеется раздел, где автор на 28 страницах кратко излагает содержание диссертации, практически повторяя автореферат. На мой взгляд, здесь можно было ограничиться короткими фразами, подобно тому, как это делается в вводных разделах каждой из глав.

– Отсутствуют заключительные разделы в главах, где разумно было бы обобщить полученные в этих главах результаты.

– Используются шрифты различных типов и размеров в тексте диссертации, перемешаны русский и английский языки при обозначении единиц измерения различных величин в тексте и особенно на рисунках, имеются "пустые" фрагменты, не заполненные текстом или рисунками, изменяются размеры полей в тексте, иногда рисунки приведены через несколько страниц после ссылки на них и т.д.

Указанные замечания не ставят под сомнение общий высокий уровень диссертационной работы.

Диссертационная работа Новожиловой Юлии Владимировны «Повышение эффективности и стабилизация частоты мощных гиротронов при воздействии внешнего сигнала» соответствует всем предъявляемым ВАК требованиям и критериям "Положения о присуждении ученых степеней", 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 –

Лукша Олег Игоревич

уч. звание – доцент, уч. степень – доктор физ.-мат. наук

профессор Высшей инженерно-физической школы ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Специальность 01.04.04 – физическая электроника

E-mail: gyrotron@mail.ru

Тел.: +7(812)552-61-27

Адрес: 195251 г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая,

д. 29, СПбПУ

