

ОТЗЫВ

официального оппонента
о диссертационной работе Новожиловой Юлии Владимировны
«Повышение эффективности и стабилизация частоты мощных
гиротронов при воздействии внешнего сигнала»,
представленной на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 1.3.4 – радиофизика

Диссертационная работа Ю.В. Новожиловой содержит результаты теоретических и экспериментальных исследований методов повышения эффективности мощных гиротронов и стабилизации их частоты при воздействии внешнего сигнала или излучения, отраженного от внешней нагрузки гиротрона. Интерес к данной тематике обусловлен тем, что в настоящее время гиротроны являются наиболее мощными источниками излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн и используются для различных практических приложений. Важность решения проблемы стабилизации частоты и повышения эффективности мощных гиротронов обусловлена, в частности, потребностями нагрева плазмы и ее диагностики, необходимостью управления токами в больших токамаках и стеллараторах, планами создания будущих комплексов когерентно излучающих гиротронов. Отмеченные обстоятельства делают тему диссертации, безусловно, весьма актуальной. Следует также подчеркнуть своевременность развития данной тематики, поскольку до появления двухканального квазиоптического преобразователя, разработанного в Институте прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН в 2015 году, ввод внешнего сигнала в мощные гиротроны был достаточно проблематичным.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списков публикаций автора по теме диссертации и цитированной литературы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, перечислены цели и задачи работы, описаны методы исследования и вклад автора в получение представленных в диссертации результатов, отмечены их новизна, достоверность и практическая значимость, кратко изложено содержание работы, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена получению и обсуждению уравнения возбуждения гиротрона с внешним или отраженным сигналом. Данное уравнение выведено с помощью метода возмущений в приближении слабого влияния электронного пучка, внешнего сигнала и омических потерь в резонаторе гиротрона на продольную структуру его поля. Показано, что в рамках этого приближения можно корректно описать воздействие внешней волны, поступающей из выходного волновода, сопряженного с резонатором гиротрона, на поле в резонаторе. Отмечается, что приближение фиксированной продольной структуры поля является, с одной стороны, обоснованным для рассматриваемых гиротронов. С другой стороны, поскольку в данном приближении гиротрон описывается уравнениями в полных производных, используемое описание позволяет уменьшить

время численных расчетов, а также получить ряд результатов аналитически и продемонстрировать таким образом их общность для различных гиротронов. В этой же главе найдено соотношение между полями внутри резонатора гиротрона и в выходном волноводе, что позволяет получить сравнительно простую связь мощности внешнего или отраженного сигнала с его безразмерной амплитудой, входящей в уравнение возбуждения. Кроме того, в заключительном параграфе данной главы разработана оптимизация численного моделирования исследуемых процессов, дающая возможность ускорить проведение расчетов.

Во второй главе исследуется захват частоты мощного многомодового гиротрона внешним монохроматическим сигналом. Продемонстрировано, что воздействие такого сигнала даже относительно небольшой мощности, составляющей несколько процентов от мощности гиротрона, полностью меняет картину конкуренции его мод. При этом изменение характера взаимодействия мод гиротрона приводит к расширению зоны захвата, в том числе в область оптимальных значений ведущего магнитного поля, что позволяет увеличить ток, мощность и КПД гиротрона. Особенно существенно этот эффект проявляется для гиротронов субмиллиметрового диапазона длин волн, где в отсутствие внешнего сигнала мегаваттный уровень мощности недостижим из-за возбуждения паразитных мод, в то время как внешний сигнал с относительно небольшим уровнем мощности позволяет заметно повысить мощность излучения гиротрона. Установлено, что другим важным преимуществом режима захвата частоты внешним сигналом по сравнению с автономной генерацией является увеличение полосы перестройки частоты при изменении частоты управляющего сигнала, дающее возможность получить излучение со стабильной частотой в достаточно широком диапазоне ее значений. В этой же главе показано, что теоретические результаты, полученные автором, находятся в хорошем согласии с имеющимися экспериментальными данными по захвату частоты гиротрона внешним сигналом.

Третья глава диссертации посвящена исследованию воздействия квазимонохроматического сигнала на режимы генерации гиротрона. Показано, что до тех пор, пока частота внешнего сигнала не выходит из полосы захвата, а модуляция амплитуды внешнего сигнала невелика, происходит захват частоты гиротрона и генерация на его рабочей моде. При этом частота и амплитуда излучения отслеживают изменения параметров внешнего сигнала. Если же модуляция частоты или амплитуды внешнего сигнала достаточно глубокая, возникают биения на рабочей моде или возбуждение соседних мод. Отмечена важность рассмотренных задач для определения приемлемого разброса параметров управляющего сигнала, а также для плазменных экспериментов с возбуждением ионно-звуковых волн при воздействии излучения гиротронов.

В четвертой главе исследованы режимы генерации гиротрона с удаленным нерезонансным отражателем. Показано, что даже в случае слабого отражения при достаточно протяженной линии запаздывания в системе существует несколько стационарных состояний, различающихся продольной структурой поля в этой линии. При изменении параметров гиротрона, линии запаздывания или отражателя частота излучения меняется в существенно меньшем интервале, чем в отсутствие отражения, то есть стабилизируется. Слабое изменение частоты гиротрона происходит до тех пор, пока сохраняется продольная структура поля (число максимумов и минимумов стоячей волны) в линии запаздывания. Если же

изменение параметров системы достаточно велико, число продольных вариаций поля в линии запаздывания меняется и происходит обусловленный гистерезисом скачок частоты и амплитуды излучения. Аналитически и численно проведено исследование устойчивости стационарных состояний относительно роста возмущений амплитуды и относительно роста возмущений в виде боковых симметрично отстоящих по частоте сателлитов, являющегося аналогом четырехфотонного распада в оптике. Показано, что стабилизированные по частоте состояния могут быть устойчивы относительно обоих типов возмущений. Проведено сопоставление полученных теоретических результатов с данными эксперимента по воздействию волны, отраженной от удаленной нерезонансной нагрузки в виде диафрагмы выходного волновода, на технологический гиротрон с рабочей частотой 28 ГГц.

В пятой главе рассматривается стабилизация частоты гиротрона при отражении части его излучения от внешнего резонатора. Хотя подобные схемы широко используются в лазерах, магнетронах и клистродах, общая теория этого явления рассматривалась лишь для случая неоптимальной (нулевой) фазы запаздывания, что исключает или существенно нивелирует эффект стабилизации частоты. В диссертации помимо аналитического обоснования эффекта стабилизации частоты произвольного автогенератора с отражением от внешнего высокочастотного резонатора, исследована устойчивость полученных состояний со стабильной частотой и найден сценарий возвращения в исходное состояние при возникновении малых возмущений амплитуды и фазы автогенератора или внешнего резонатора. Отмечено, что полученные результаты легли в основу эксперимента по стабилизации частоты технологического гиротрона с рабочей частотой 28 ГГц и отражением от внешнего квазиоптического резонатора. Показано, что соответствующие теоретические и экспериментальные данные находятся в полном согласии.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить, что она представляет собой крупную законченную работу, в которой получены новые научные результаты, важные как в теоретическом отношении, так и в практическом плане. Среди наиболее существенных достижений автора диссертации, по моему мнению, следует особо выделить получение ряда важных результатов аналитическим путем. Это позволяет использовать результаты диссертации для объяснения уже выполненных экспериментов, а также планирования будущих экспериментов с гиротронами в широкой области их параметров, что значительно увеличивает ценность диссертации Ю.В. Новожиловой.

Все результаты диссертации имеют четкое обоснование и ясную физическую интерпретацию. Тщательность проведения теоретических расчетов, согласие сделанных на их основе заключений с экспериментальными данными, а также с результатами других исследователей, полученными в ряде частных случаев, позволяют считать научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, обоснованными и достоверными.

Личный вклад автора в получение результатов диссертации состоит в постановке и решении рассмотренных в ней теоретических задач, участии в планировании и определении условий соответствующих экспериментов, а также анализе их данных и не вызывает сомнений.

Диссертация написана ясным, четким языком, хорошо оформлена, содержит большое число иллюстраций, делающих изложение полученных результатов весьма наглядным.

Работа не свободна, однако, от недостатков:

1. Граничное условие для уравнения (1.1.6) задается автором в сечении $z=z_{ex}$ выходного волновода гиротрона, которое может быть выбрано неоднозначно. При этом в главе 1 (с. 55) отмечается, что различия в выборе данного сечения не приводят к ошибкам, превышающим погрешности применяемого в работе приближенного метода возмущений. Однако данное утверждение не подкрепляется в диссертации результатами конкретных численных расчетов.
2. В главе 2 при рассмотрении включения ускоряющего напряжения в гиротроне используется модельная функция (2.1.2) либо сумма указанной функции и сравнительно малого дополнительного слагаемого, гармонически зависящего от времени (см. формулу (2.2.1)). Было бы полезно обсудить, насколько заметно полученные результаты зависят от изменения вида данной функции при сохранении ее формы близкой к реалистичным сценариям включения ускоряющего напряжения.
3. При рассмотрении режима захвата частоты гиротрона внешним сигналом в главе 2 автором обсуждается влияние различных факторов неидеальности электронного пучка (разброс начальных скоростей соосного с резонатором тонкого пучка, неодинаковость этих скоростей по сечению пучка конечной толщины) на КПД генерации. Остается неясным, почему независимо от вида неидеальности пучка в расчетах используется только одно значение числа фракций пучка, равное 5.
4. Диссертация выиграла бы, если бы каждая ее глава завершалась разделом с краткими выводами по полученным в ней результатам. Такой раздел (с номером 3.3) имеется лишь в главе 3.
5. В тексте диссертации имеются некоторые погрешности представления иллюстративного материала. В частности, разные части ряда рисунков, либо некоторые рисунки и подписи к ним оказываются расположенными на разных страницах (см. рис. 2.1.8, 2.2.2, 3.1.2–3.1.5, 3.1.10, 3.2.2, 3.2.3, 3.2.5, 4.1.6, 4.2.6, 5.4), что затрудняет ознакомление с содержанием работы.

Отмеченные недостатки не могут влиять на общую положительную оценку данной диссертации, ее научной и практической значимости.

Основные результаты диссертации Ю.В. Новожиловой опубликованы в 44 статьях в рецензируемых журналах из списка ВАК и 39 работах в сборниках трудов и тезисов докладов международных и российских научных конференций. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, можно заключить, что диссертация Ю.В. Новожиловой «Повышение эффективности и стабилизация частоты мощных гиротронов при воздействии внешнего сигнала» является завершенной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение,

и удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (ред. от 25.01.2024 г.), которые предъявляются к докторским диссертациям, а ее автор Новожилова Юлия Владимировна, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.4 – радиофизика.

Выражаю согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации Ю.В. Новожиловой.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук (специальность 1.3.4 – радиофизика), профессор, заведующий кафедрой электродинамики радиофизического факультета Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского



20.09.2024г.

Кудрин Александр Владимирович

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского».
Адрес: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23.
Тел.: (831) 4623262, электронный адрес: kud@rf.unn.ru

Подпись доктора физ.-мат. наук, профессора
А.В. Кудрина заверяю:

Ученый секретарь ученого совета
Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского



Л.Ю. Черноморская

20 сентября 2024 г.