

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **Григорьевой Наталии Вадимовны «Особенности синхронизации и подавления паразитных колебаний в гиротроне при воздействии внешнего гармонического сигнала»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика

Гиротроны находят применение в ряде областей науки и техники; в частности, они используются для микроволнового нагрева различных материалов, как источник терагерцевого излучения в установках для спектроскопических измерений, для диагностики плазмы по коллективному томсоновскому рассеянию, в биомедицинских исследованиях. Однако особо следует отметить применения гиротронов для электронно-циклотронного нагрева плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза.

В установках управляемого термоядерного синтеза используются комплексы из большого числа гиротронов, поэтому важно обеспечение их когерентной работы. При этом задача о синхронизации гиротрона внешним сигналом имеет ряд особенностей по сравнению с другими радиофизическими и электронными генераторами. В частности, для этих систем важен КПД; при этом максимальный поперечный электронный КПД в типичных гиротронах достигается в режиме жесткого возбуждения. Несмотря на интерес исследователей к данной проблеме, остается неизученным ряд важных с практической точки зрения вопросов: влияние внешнего сигнала на выходную мощность и КПД, при каких условиях достигается максимальная ширина полосы синхронизации и т.д. Воздействие внешнего сигнала позволяет не только стабилизировать частоту и фазу рабочей моды, но и помогает обеспечить подавление паразитных мод. При продвижении в область более высоких частот и больших мощностей в гиротроне переходят к работе на модах более высокого порядка — как следствие, обостряется проблема конкуренции мод.

Вышеперечисленное определяет актуальность, научную и практическую значимость диссертационной работы Н.В. Григорьевой «Особенности синхронизации и подавления паразитных колебаний в гиротроне при воздействии внешнего гармонического сигнала» как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Конкретно, предметом работы является теоретическое исследование особенностей синхронизации и подавления паразитных колебаний в гиротроне под воздействием внешнего сигнала при помощи методов теории колебаний и нелинейной динамики. В главах диссертации решены следующие задачи: проведен бифуркационный анализ одномодовой модели; проанализирована устойчивость рабочей моды в многомодовом гиротроне; изучена возможность подавления паразитных мод в процессе установления колебаний при выбросе импульса на фронте напряжения.

Рассматриваемая диссертационная работа состоит из введения, трех оригинальных глав и заключения. Объем диссертации составляет 130 страниц. Работа включает 48 рисунков. Список литературы содержит 95 наименований.

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации; формулируются цели и предмет исследования и выносимые на защиту положения; описываются научная новизна и практическая значимость работы, методы исследования и личный вклад соискателя Н.В. Григорьевой и краткое содержание работы.

**В первой главе** получена одномодовая математическая модель для исследования задачи о синхронизации гиротрона с фиксированной структурой ВЧ поля внешним гармоническим сигналом. Функция электронной восприимчивости, определяющая мгновенную мощность взаимодействия пучка с полем резонатора, предварительно рассчитывается при различных значениях амплитуды поля и расстройки циклотронного резонанса, а затем вычисляется с помощью интерполяции. Полуаналитически определяются локальные бифуркации в системе и общий вид резонансных кривых в удобных для анализа переменных. Производится пересчет полученных карт режимов в терминах естественных управляющих параметров и наблюдаемых. Проводится детальное исследование управления устойчивостью как рабочих режимов гиротрона, так и режима регенеративного усиления. Все режимы анализируются с точки зрения максимизации поперечного электронного КПД для рабочих режимов. Строится подробная карта бифуркационных сценариев, включая нелокальные бифуркации.

**Во второй главе** анализируется проблема подавления паразитных мод в многомодовой модели с эквидистантным спектром. Получены полуаналитические результаты для трехмодовых неустойчивостей  $m_0 \pm 1$ . Поступательно получены результаты для двухмодовых неустойчивостей, трехмодовых  $m_0 \pm 1$  и для произвольного количества пар  $m_0 \pm s$  вплоть до 5. Все результаты пересчитываются в терминах практически важных наблюдаемых и управляющих параметров, а также анализируются с точки зрения КПД. Все полученные данные относительно устойчивости анализируются в совокупности.

**В третьей главе** в рамках многомодовой модели исследуется задача о подавлении возбуждения паразитных мод на фронте импульса ускоряющего напряжения. Последнее представляет основную проблему с точки зрения запуска гиротрона и его вывода на рабочий режим генерации. Помимо общей теоретической картины, получены важные с практической точки зрения частные результаты: при выбросе напряжения порядка 5.5% от рабочего требуемая мощность внешнего сигнала составляет примерно 10% мощности генерации в автономном режиме.

Исследования в работе проведены систематически и основательно, с надлежащим подбором методов. Их отличает полнота и законченность. Сочетание аналитических методов и численного моделирования показывает квалификацию автора.

Достоверность научных выводов обеспечивается использованием хорошо апробированных аналитических и численных методов; подтверждается соответствием результатов

бифуркационного анализа и численного моделирования, а также воспроизведением результатов, известных из литературы.

**У оппонента возникли замечания по работе:**

1) *Выбор распределения поля в резонаторе.* На стр. 17 в предложении с ур. (1.4) задается распределение поля в резонаторе  $f_0(\zeta)$ . Даже если это совершенно стандартная и хорошо обоснованная форма распределения, ей уделено одно короткое предложение, формулировка которого подразумевает некоторую произвольность выбора, а не нечто, хорошо обоснованное и устоявшееся.

2) *Довольно сложно разобраться с интерпретацией данных на рис. 1.4.*

2.а) Все изложение совершенно верно, но построить полную картину по рис. 1.4 и описанию в тексте было очень сложно. Возможно, помогло бы представить качественные фазовые портреты для точек на различных типовых элементах резонансных кривых на рис. 1.4а.

2.б) Мне не хватало подписей значений  $F$  на графике 1.4а. Если по мере роста  $F$  контур резонансных кривых монотонно растет, то непонятно, как соотносятся некоторые элементы графиков 1.4а и 1.4в. Ведь точка первого смыкания резонансных кривых, согласно тексту,  $F_{c1} \approx 0.074$ . На (в) все подписи для  $F < F_{c1}$ ; представляется, что кривые для  $F_{c1} = 0.025$  и  $0.04$  должны быть подобны случаю  $0.01$  (ср. рис. 1.4а), но их устойчивые сегменты (сплошные линии) простираются дальше точки смыкания линий  $AH_1$  и  $SN_1$ . (На рис. 1.5 и 1.6 сопоставление графиков (а) и (в) вопросов не вызывает.)

2.в) На рис. 1.4б следовало бы взять чуть больший диапазон по  $F$ , чтобы не «потерялся» сегмент кривой  $AH_1$ , который на графике (а) находится справа. Тогда будет очевидно, что ветка  $SN_1$  имеет «острый» разворот и около этого разворота от нее отходит сегмент  $AH_1$ . (С рис. 1.5 такой сложности нет, но читатель будет разбираться по первому рисунку такого типа).

2.г) Стр. 29, 9-ая строка снизу: «... пересечение линии  $SN_1$  соответствует рождению седла и устойчивого узла...»

Следует понимать «первое пересечение»? По крайней мере, вблизи концов «языков». Или более полно: пересечение сегмента  $SN_2$  (и  $SN_1$ ) до точки смыкания с  $AH_2$  (и с правой веткой  $AH_1$ , которая на графике (б) начинается сразу за пределами построенной области)?

В целом, из текста неочевидно, где разделены сегменты  $SN_1$  и  $SN_2$ , ведь вместе они формируют замкнутый контур. Предположить, как они разделяются, можно только из детального сопоставления графиков (а) и (б) при уже сформированном понимании общей картины. (Мои вопросы выше сформулированы в предположении, что разделение задается выколотыми точками смыкания резонансных кривых.)

3) *Комментарий к рис. 1.10 на стр. 40* про аналогичность случаю рис. 1.9 вызывает небольшие вопросы. На рис. 1.10 представлены фазовые портреты из области параметров, где есть  $SN_1$  (седло-узловая бифуркация). Для  $\Omega < 0$  это больше бы соответствовало не рис. 1.9, а очень узкому участку (см. рис. 1.8), где уже появилась  $SN_2$ , но еще не исчезла  $AH_2$ . Для ана-

лога рис. 1.9, как это комментируется в тексте, нужно подниматься выше  $\Omega \approx 2.2$ . Случаем больших  $\Omega$  точнее было бы называть сценарий для  $\Omega > 2.2$ , и он, наверное, будет полностью подобен случаю на рис. 1.9.

4) *Про радиальный индекс* в связи с абзацем внизу стр. 62. Представляется, что цилиндрической моде с азимутальным индексом  $m \gg 1$  и в  $2 \div 3$  больше радиального индекса  $l$  соответствует структура в физическом пространстве, у которой ближе к периметру, но на достаточном от него удалении структура будет примерно периодической и в радиальном направлении. Период в азимутальном направлении  $2\pi r/m$  близок к периоду в радиальном направлении  $\approx r/l \approx (2 \div 3)r/m$ . Не будут ли моды  $l_0 \pm 1$  сопоставимы по частоте с  $m_0 \pm 1$  и тоже почти эквидистантны (линеаризация спектра по  $l$  при  $l \gg 1$ )?

5) *Формулировка «зависимость массы электрона от энергии»* над ур. (3.1) на стр. 110. Понятно, что имеется в виду, однако после развития СТО, а не в рамках описания экспериментов без ее учета, такая формулировка не является физически корректной. Нет смысла говорить о массе как о мере инертности для классического Второго закона Ньютона, поскольку он неприменим в нерелятивистской формулировке для релятивистских скоростей. А в рамках релятивистской формулировки масса является скаляром — не зависит от скорости СО.

6) *Автореферат имеет объем 21 стр.* По моему мнению, и представленная научная работа, и результаты очень хорошие, и их можно было изложить на 16 стр. без ущерба для представления сильных сторон диссертации и самых значимых результатов.

Существенных с научной точки зрения замечаний материал диссертации у меня не вызвал.

Отмеченные замечания не влияют на общее положительное впечатление от работы Н.В. Григорьевой, которая выполнена на хорошем профессиональном уровне. Анализ полученных в диссертационной работе результатов дает основания отметить, что работу отличает актуальность обсуждаемых проблем, адекватность предложенных и использованных подходов и обстоятельность в проведении исследовательской работы. Результаты, выводы и научные положения работы являются новыми, а их обоснованность и достоверность не вызывает сомнений. Диссертация соответствует специальности 1.3.4. – Радиофизика, а автореферат достаточно полно и правильно передает ее содержание. Материалы работы достаточно полно отражены в 25 публикациях, из которых 6 статей — в реферируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук и индексируемых в международных реферативных базах данных и системах цитирования Web of Science и/или Scopus, 6 работ — в трудах конференций, индексируемых в базах данных и системах цитирования Web of Science и/или Scopus. Результаты докладывались на представительных российских и международных конференциях. Несомненно, автор является квалифицированным специалистом в области радиофизики и сложной динамики нелинейных систем; она способна как получать аналитические результаты, так и проводить численное моделирование. С

точки зрения состоятельности соискателя как зрелого исследователя, хотелось бы отметить работу [71], опубликованную без соавторов и выполненную на хорошем научном уровне. Диссертационная работа Н.В. Григорьевой написана грамотным литературным языком, хорошо оформлена и является законченным научным исследованием.

Считаю, что диссертационная работа «Особенности синхронизации и подавления паразитных колебаний в гиротроне при воздействии внешнего гармонического сигнала» удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13 и 14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, **Григорьева Наталия Вадимовна**, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **1.3.4. – Радиофизика**.

Я, Денис Сергеевич Голдобин, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

Заведующий Лабораторией подземной утилизации углерода  
Института механики сплошных сред УрО РАН  
канд. физ.-мат. наук (специальность 01.02.05)



Денис Сергеевич Голдобин  
28.11.2024

Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук  
614013, РФ, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1, ИМСС УрО РАН  
тел.: +7-950-4411276, e-mail: Denis.Golobin@gmail.com

Подпись Голдобина Дениса Сергеевича заверяю

« 28 » ноября 2024 г.

Ученый секретарь «ИМСС УрО РАН»,  
к.ф.-м.н.



Н.А. Юрлова