

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе ФГБОУ

ВУЗ «Национальный исследовательский университет «МЭИ»



Д.т.н., профессор

В. К. Драгунов

2020 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» на диссертацию Адиловой Асель Булатовны «Влияние запаздывания в канале связи на синхронизацию связанных автогенераторов с предельным циклом», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика»

**Объект исследования.** Исследованы особенности процесса сложения сверхвысокого уровня мощности автоколебательных систем диапазона крайне высоких радиочастот за счёт взаимной амплитудной и фазовой синхронизации двух одинаковых приборов типа гиротрона при учёте жёсткого возбуждения, неизохронности колебаний и запаздывания сигнала, распространяющегося между ними, существенно превышающего период собственной частоты.

**Актуальность работы.** Диссертационная работа А.Б. Адиловой посвящена решению актуальной задачи радиофизики, заключающейся в выявлении основных механизмов и закономерностей процессов синхронизации в системах двух автогенераторов, с запаздыванием в линии связи между ними и в применении полученных результатов для анализа взаимной синхронизации двух связанных гиротронов. Получение сверхвысокого уровня мощности путем сложения сигналов нескольких мощных генераторов является важной проблемой радиофизики и сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники. В частности, большой интерес представляет задача о взаимной синхронизации мощных гиротронов, поскольку комплексы, состоящие из нескольких гиротронов, используются для нагрева плазмы в перспективных установках управляемого

термоядерного синтеза в соответствии с программой международного сотрудничества в области ядерной энергетики. Таким образом, не вызывает сомнений **актуальность и практическая значимость** темы диссертации.

**Структура и объём диссертационной работы.** Диссертация состоит из представленных нам 132 страницах Введения, трёх глав (разделов), Заключения и Списка литературы из 99 библиографических ссылок, включая 25 опубликованных работ диссертанта.

Основные результаты диссертации изложены в трех разделах (главах). **В первом разделе** проведен бифуркационный анализ взаимной синхронизации в системе двух связанных автоколебательных осцилляторов Ландау–Стюарта с учетом конечного времени запаздывания в канале связи. Показано, что запаздывающий характер связи определяет картину синхронизации генераторов. В рамках диссертационного исследования получено обобщенное уравнения Адлера для разности фаз колебаний, с помощью которого получены простые формулы для границ седло-узловых бифуркаций, ограничивающих области синфазного и противофазного синхронных режимов. Было показано, что при увеличении параметра неизохронности топологическая структура процесса синхронизации претерпевает изменения, аналогичные тем, которые происходят по мере увеличения набега фазы. В частности, обнаружено, что с ростом параметра неизохронности происходит переход от диссипативной связи к инерционной, в результате чего область синхронизации на противофазной моде увеличивается в размерах и выходит за границы синхронизации на синфазной моде.

**Второй раздел** посвящен взаимной синхронизации генераторов с жёстким возбуждением и с запаздывающей связью. Изучена картина синхронизации в такой системе. Обнаружено, что помимо режимов взаимной синхронизации с примерно равными амплитудами колебаний, возможны также стационарные режимы с подавлением колебаний одного генератора другим. Проанализированы бифуркационные сценарии рождения и исчезновения различных режимов. В частности, выявлена разновидность эффекта гибели (вымирания, срыва) колебаний, которая обусловлена трансформацией бассейна притяжения устойчивой нулевой неподвижной точки, в результате чего, если в начальный момент времени колебания генераторов близки к противофазным, то в дальнейшем их размах затухает при любых начальных амплитудах.

**В третьем разделе** предложена модифицированная квазилинейная модель системы связанных гиротронов, основанная на аппроксимации функции электронной восприимчивости, найденной в результате расчетов с помощью уравнений нестационарной теории гиротрона с фиксированной структурой высокочастотного поля.

Модель позволяет получить результаты, не только качественно, но и количественно согласующиеся с нестационарной теорией гиротрона с фиксированной структурой поля.

Также предложен физически обоснованный способ управляемых переключений между синфазной и противофазной модами в системе двух связанных гиротронов, который основан на кратковременном уменьшении мощности генерации одного из гиротронов.

В заключительном разделе третьей главы рассмотрен процесс синхронизации двух связанных гиротронов, при котором учитывается конкуренция двух собственных мод. Показано, что введение связи между гиротронами может приводить к подавлению паразитных мод.

Таким образом, можно заключить, что диссертацию А.Б. Адиловой отличают высокий уровень **научной новизны** и **значимости** полученных результатов. В то же время, они имеют очевидное **практическое значение**, поскольку на их основе могут быть предложены способы обеспечения когерентных режимов работы в ансамблях мощных генераторов (гиротронов, магнетронов и т.д.), которые находят применение для получения мощного излучения диапазонов крайне высоких (терагерцевых) частот. Исследованные режимы быстрого переключения мод также могут найти применение для ряда приложений, например, для подавления плазменных неустойчивостей в процессе СВЧ-нагрева.

**Практическая значимость диссертационной работы.** Результаты диссертации представляют интерес для широкого круга специалистов, занимающихся исследованиями и разработкой гиротронов и их приложениями в различных областях физики и техники.

**Рекомендации по использованию материалов работы.** Полученные в диссертации результаты рекомендуются к использованию в научно-исследовательских учреждениях и производственных организациях: Институт радиотехники и электроники РАН (г. Москва) и его Саратовский филиал, Институт общей физики РАН (г. Москва), Институт прикладной физики РАН (г. Ниж. Новгород), Институт сильноточной электроники СО РАН (г. Томск), НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Научно-производственное предприятие «ГИКОМ», (г. Ниж. Новгород), в Российском федеральном ядерном центре – Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики, г; Саров, Нижегородской области. Результаты могут быть использованы в научных исследованиях и внедрены в учебный процесс в вузах, ведущих подготовку в области радиофизики и энергетики: в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ», в Национальном исследовательском университете «МЭИ» (Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова), Нижегородском государственном

университете им. Н. И. Лобачевского, в Новосибирском государственном университете (НГУ); в Санкт-Петербургском государственном университете (СПбГУ), в Томском государственном университете (ТГУ), в Саратовском государственном университете им. Н. Г. Чернышевского (СГУ), в Казанском (Приволжском) федеральном университете (КФУ, г. Казань), в Московском физико-техническом государственном институте (МФТИ, г. Москва), в Балтийском федеральном университете им. И. Канта (БФУ, г. Калининград), в Волгоградском государственном университете (ВолГУ, г. Волгоград), в Южном федеральном университете (ЮФУ, г.г. Ростов-на-Дону – Таганрог, Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения), в Российском университете дружбы народов (РУДН, г. Москва), в Алтайском государственном университете (АлтГУ, г. Барнаул), в Воронежском государственном техническом университете (ВГТУ, г. Воронеж).

**Достоверность и обоснованность полученных результатов:** Обоснованность и достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается использованием широко апробированных и хорошо зарекомендовавших себя аналитических и численных методов, соответствием результатов бифуркационного анализа и численного моделирования, качественным соответствием результатов, полученных для различных моделей связанных систем, воспроизведением в качестве тестовых расчетов достоверных общепризнанных результатов, известных из литературы.

**Личный вклад автора:** Заметный личный вклад диссертанта в 25 работах, выполненных в соавторстве с научным руководителем, не вызывает сомнений.

**Полнота изложения материалов диссертации в публикациях и апробация:** Основные результаты работы опубликованы в 3-х научных статьях в русскоязычных изданиях из Перечня ВАК, в 8-ми публикациях в трудах англоязычных научных конференций, реферируемых в международных реферативных базах данных и системах цитирования Scopus и Web of Sciences; список опубликованных научных трудов автора содержит 25 наименований. Результаты исследований апробированы на международных и всероссийских научных конференциях и научных семинарах.

**Замечания по диссертационной работе.** Диссертационная работа А. Б. Адиловой не свободна от ряда недостатков. Основные замечания сводятся к следующему.

1. Нет количественных оценок величины времени запаздывания связи между автоколебательными системами по отношению к периоду частоты циклотронного резонанса или к постоянной времени установления амплитуды колебаний в одиночной колебательной системе терагерцевого диапазона частот, при котором

- возможен переход к нежелательным явлениям мультистабильности или срыва (вымирания, гибели) колебаний;
2. Не сформулированы условия эффективного сложения мощностей ансамбля двух автоколебательных систем (гиротронов) различной мощности в общей нагрузке.
  3. В тексте диссертации есть стилистические ошибки и неточности. В частности, не достаточно обоснованы упоминания о канале связи и о предельных циклах в названии работы; имеются нарушения требований национальных стандартов Российской Федерации ГОСТ 2.105–95, ГОСТ Р 7.0.11–2011 и ГОСТ Р 7.0.100–2018.

Однако отмеченные недостатки **не являются принципиальными** и не снижают общей положительной оценки работы.

**Заключение.** Диссертация А. Б. Адиловой является завершённой научно-квалификационной работой, которая выполнена на высоком научном уровне и содержит новые научные результаты, имеющие существенное значение для радиофизики, включая многочисленные приложения. Диссертационная работа соответствует требованиям Высшей аттестационной комиссии ВАК и п.п. 9 - 11, 13, 14 «Положения о порядке присуждения учёных степеней в РФ», предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор, Адилова Асель Булатовна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика».

Тема диссертации соответствует специальности 01.04.03 – «Радиофизика». Автореферат достаточно полно и правильно отражает её содержание. Адилова А.Б. является высококвалифицированным специалистом - радиофизиком, имеющим навыки теоретического анализа и численного моделирования.

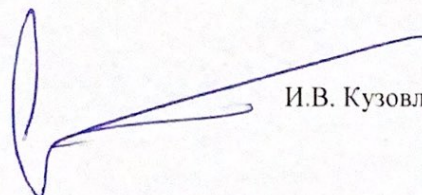
Диссертационная работа была заслушана и обсуждена на заседании научного семинара кафедры формирования и обработки радиосигналов Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Национального исследовательского университета «МЭИ» 14 октября 2020 года (протокол № 8).

Заведующий кафедрой Формирования и обработки радиосигналов, к.т.н., доцент



А.Р. Сафин

Подпись А.Р. Сафина заверяю  
Ученый секретарь Ученого совета НИУ «МЭИ»



И.В. Кузовлев

Реквизиты организации:

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»), Радиотехнический факультет, кафедра Формирования и обработки радиосигналов

Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, дом14.

Тел. +7(495) 362-70-01

Факс: +7 495 362-89-38

Эл. почта: [universe@mpei.ru](mailto:universe@mpei.ru)

Сайт: <http://mpei.ru>