

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Синхронизация в системах СВЧ-генераторов, связанных с задержкой

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)

аспирантки 4 курса

направления 03.06.01 «Физика и астрономия»

факультета нелинейных процессов

Адиловой Асель Булатовны

Научный руководитель

заведующий кафедрой динамических систем

на базе СФ ИРЭ РАН, д.ф.-м.н., профессор

_____ Н.М. Рыскин

Саратов 2019

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Изучение взаимной синхронизации в ансамблях связанных осцилляторов является фундаментальной проблемой нелинейной динамики и имеет большое значение для многих приложений в области радиофизики, электроники, лазерной физики, биофизики и т.д. В частности, в радиофизике и электронике для сложения мощностей широко применяются системы связанных микроволновых генераторов, например, магнетронов. В последние годы привлекли внимание задачи о синхронизации мощных гиротронов (мазеров на циклотронном резонансе), поскольку они используются для электронно-циклотронного нагрева плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза. Например, в проекте ITER планируется использование 26 гиротронов мощностью 1 МВт на частоте 170 ГГц.

Однако на сверхвысоких частотах расстояние между связанными генераторами может существенно превышать длину волны, поэтому необходимо учитывать запаздывание сигнала, распространяющегося между ними. Учет запаздывания превращает систему из конечномерной в распределенную, т.е. обладающую бесконечным числом степеней свободы. Не вызывает сомнений, что, картина синхронизации в системах с запаздыванием должна иметь ряд специфических особенностей по сравнению с системами с малым числом степеней свободы. В то же время, вопросы синхронизации многомодовых систем изучены еще недостаточно.

Таким образом, задача изучения особенностей синхронизации в системах генераторов, связанных с задержкой, представляется актуальной.

Цель работы состоит в выявлении основных механизмов и закономерностей процессов синхронизации двух автоколебательных систем, связанных с задержкой, а также в исследовании влияния конкуренции мод на режимы синхронизации.

Основными задачами данной работы являются:

1. Бифуркационный анализ взаимной синхронизации двух автоколебательных осцилляторов с кубичной нелинейностью, связанных с задержкой, в изохронном и неизохронном случаях.
2. Разработка модифицированной квазилинейной модели системы двух связанных гиротронов, ее бифуркационный анализ, сопоставление с результатами, полученными при анализе системы с кубичной нелинейностью.
3. Численное моделирование режимов синхронизации системы двух связанных гиротронов на основе нестационарной теории с фиксированной структурой высокочастотного поля. Сопоставление с результатами, полученными для модифицированной квазилинейной модели.
4. Анализ особенностей режимов синхронизации двух связанных гиротронов в режиме жесткого возбуждения.
5. Исследование возможности переключения частоты в системе двух связанных гиротронов.
6. Численное моделирование влияния внешнего сигнала на процессы конкуренции мод в гиротроне.

Объектом исследования являются модели связанных с задержкой автоколебательных систем с предельным циклом, описываемые дифференциальными уравнениями с запаздывающим аргументом для медленно меняющихся комплексных амплитуд, а также модели связанных гиротронов на основе нестационарной теории с фиксированной структурой высокочастотного поля.

Достоверность полученных результатов 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, а также широкой апробацией результатов работы, обсуждением результатов работы на многочисленных международных конференциях.

Научная новизна работы:

1. Впервые проведен бифуркационный анализ синхронизации в системе двух связанных автоколебательных осцилляторов Ландау–Стюарта с учетом конечного времени запаздывания в канале связи.
2. Предложена упрощенная модель системы связанных гиротронов в виде системы дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом, которая позволяет исследовать режимы синхронизации, используя методы и представления, выработанные в нелинейной динамике, в том числе, проводить бифуркационный анализ, используя автоматизированные пакеты, например, XPPAUTO и DDEBifTool.
3. В системе двух связанных генераторов с жестким возбуждением обнаружена мультстабильность, которая обусловлена тем, что помимо режимов синхронизации, существуют режимы с подавлением колебаний одного из генераторов другим, а также режимы взаимного подавления колебаний.
4. Обнаружена и исследована возможность переключения мод в системе двух связанных гиротронов. Система генераторов, связанных с задержкой, демонстрирует мультстабильность режимов синхронизации, причем число сосуществующих режимов увеличивается с ростом времени задержки. В диссертации предложен физически обоснованный способ переключения между этими режимами, основанный на кратковременном уменьшении тока одного или другого гиротрона.
5. Впервые исследована последовательность бифуркаций, приводящих к режиму синхронизации в двухмодовой модели гиротрона, в типичном случае, когда рабочая мода находится в режиме жёсткого возбуждения, а паразитная – в мягком.

Научная и практическая значимость исследования:

Результаты диссертации развивают теорию взаимной синхронизации двух автоколебательных систем, связанных с задержкой. В результате проведенного подробного бифуркационного анализа установлены принципиальные отличия от известной картины взаимной синхронизации двух связанных автогенераторов с одной степенью свободы, обусловленные влиянием запаздывания сигнала в канале связи. Они выражаются в наличии мультистабильности синхронных режимов и в особенностях устройства областей синхронизации на плоскости параметров «частотная расстройка – коэффициент связи».

Практическое значение результатов диссертации связано с тем, что 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 микроволнового излучения высокой мощности. Исследованные режимы быстрого переключения мод также могут найти применение для ряда приложений, например, для подавления плазменных неустойчивостей в процессе СВЧ-нагрева.

На защиту выносятся следующие положения:

1. В системе двух автоколебательных осцилляторов, связанных с задержкой, режимы синхронизации на синфазной и противофазной модах сосуществуют при значениях набега фазы сигнала в канале связи $\pi n + \pi/4 < \psi < \pi n + 3\pi/4$. На плоскости параметров частотная расстройка – коэффициент связи при малом значении параметра неизохронности область противофазной синхронизации лежит внутри области синфазной синхронизации. При увеличении значения параметра неизохронности границы этих областей меняются местами.
2. Предложенная модифицированная модель связанных гиротронов, основанная на аппроксимации функции электронной восприимчивости, найденной в результате расчетов с помощью уравнений нестационарной

теории гиротрона с фиксированной структурой ВЧ поля, позволяет определить число устойчивых состояний и их собственные частоты, хорошо описывает структуру областей синхронизации на плоскости параметров «расстройка–коэффициент связи», зависимости КПД и частоты от расстройки в режиме синхронизации, а также сложный характер амплитудной и частотной модуляции в режиме биений.

3. Взаимное воздействие двух гиротронов, находящихся в режиме жесткого возбуждения колебаний, может привести как к их синхронизации, так и к подавлению колебаний одного гиротрона другим, а также к полному подавлению колебаний обоих гиротронов.
4. При наличии мультстабильности синхронных режимов в системе двух связанных гиротронов возможно переключение между этими режимами путем кратковременного уменьшения параметра возбуждения одного из них. При этом происходит переключение к тому из синхронных режимов, частота которого ближе к частоте генерации второго гиротрона.

Научно-квалификационная работа состоит из Введения, трех глав, и Заключения. Первая глава посвящена исследованию взаимной синхронизации автоколебательных осцилляторов с кубичной нелинейностью. Вначале рассматривалось приближение, когда время задержки мало по сравнению с характерным временем установления колебаний. При этом динамика системы описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений для медленно меняющихся амплитуд колебаний. Был проведен бифуркационный анализ при помощи программного пакета XPPAUTO. Была изучена трансформация языков синхронизации под влиянием неизохронности. Далее динамика системы рассмотрена в случае конечного времени запаздывания, когда описывается системой дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом. Представлены результаты бифуркационного анализа при помощи программного пакета DDEBifTool, изучены бифуркационные механизмы появления высших синхронных мод.

Во второй главе исследуется синхронизация в системе двух связанных гиротронов. Развита модифицированная квазилинейная модель, которая строится путем аналитической аппроксимации функции электронной восприимчивости, рассчитанной на основе теории гиротрона с фиксированной структурой высокочастотного поля. На ее основе проведен анализ режимов синхронизации, показано, что сохраняются основные закономерности, обнаруженные в главе 1 для связанных систем с кубичной нелинейностью. Проведено сопоставление с результатами моделирования на основе теории гиротрона с фиксированной структурой высокочастотного поля. Также рассмотрен случай синхронизации гиротронов в режиме жесткого возбуждения. Показано, что, помимо режимов взаимной синхронизации, когда амплитуда колебаний обоих гиротронов велика, возможны синхронные режимы, в которых один из гиротронов подавляет колебания другого и тот фактически функционирует как пассивный осциллятор в режиме вынужденных колебаний. Также возможны режимы полного взаимного подавления (гибели колебаний). Обсуждается возможность управляемого переключения между различными синхронными режимами.

В третьей главе исследуется влияние конкуренции мод на режимы синхронизации в гиротроне. Рассмотрен типичный случай, когда рабочая мода находится в режиме жесткого возбуждения, а возбуждение паразитной моды происходит мягко. Численно на основе нестационарных уравнений теории гиротрона с фиксированной гауссовой структурой поля проведено моделирование синхронизации внешним сигналом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перечислим основные результаты и выводы работы:

1. Проведен бифуркационный анализ синхронизации двух связанных автоколебательных осцилляторов Ландау-Стюарта в приближении, когда время задержки считается малым по сравнению с характерным временем установления колебаний. Показано, что структура областей

синхронизации на плоскости параметров «частотная расстройка Δ — коэффициент связи ρ » определяется набегом фазы сигнала ψ , распространяющегося между подсистемами. В случае, когда $\psi \approx \pi n$, $n \in \mathbb{Z}$, доминирует диссипативная связь. При этом имеется единственный устойчивый режим синхронизации на синфазной или противофазной моде (при четном и нечетном n соответственно). При $\psi \approx \pi n + \pi/2$ связь носит инерционный характер. В этом случае присутствует мультистабильность, т.е. возможна синхронизация как на синфазной, так и на противофазной моде. Показано, что переход к синхронному режиму при малых расстройках осуществляется в результате взаимного захвата частот, а при достаточно больших — в результате подавления собственных колебаний одного из генераторов.

2. Изучено влияние неизохронности на картину синхронизации. При малой неизохронности на плоскости параметров Δ, ρ область синхронизации на противофазной моде лежит внутри области синхронизации на синфазной моде и ограничена линией бифуркации Андронова–Хопфа. С увеличением параметра неизохронности область синхронизации на противофазной моде вначале увеличивается в размерах, а затем выходит за пределы области синфазной синхронизации. При этом форма границ области синхронизации приобретает нетривиальный вид, а именно, ширина полосы синхронизации немонотонно зависит от величины параметра связи.
3. 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 ВЧ поля. Модель позволяет получить результаты, не только качественно, но и количественно согласующиеся с нестационарной теорией гиротрона с фиксированной структурой поля. Запаздывание

сигнала в канале связи играет принципиальную роль, приводя к увеличению наблюдаемых синфазных/противофазных мод синхронизации. Модифицированная квазилинейная модель позволяет определить число устойчивых состояний и их собственные частоты, хорошо описывает структуру областей синхронизации на плоскости параметров «расстройка–коэффициент связи», зависимости КПД и частоты от расстройки в режиме синхронизации, а также сложный характер амплитудной и частотной модуляции в режиме биений. Количественно значения КПД и частоты для двух рассматриваемых моделей различаются не более чем на 5%, тогда как скорость расчета для модифицированной квазилинейной модели примерно на порядок выше. Еще одним важным преимуществом является возможность использовать для изучения режимов синхронизации автоматизированные пакеты бифуркационного анализа, такие как XPPAUTO и DDEBifTool.

4. Исследована синхронизация двух гиротронов в режиме жесткого возбуждения, связанных с задержкой. Показано, что, помимо существования синхронных режимов с высоким КПД, возможны синхронные режимы, в которых один из гиротронов подавляет колебания другого и тот фактически функционирует как пассивный осциллятор в режиме вынужденных колебаний. Также возможно полное взаимное подавление колебаний обоих гиротронов – аналог эффекта гибели колебаний. Однако, в отличие от классического случая гибели колебаний, в данном случае этот эффект обусловлен не увеличением диссипации, а тем, что сигнал, поступающий по каналу связи, переводит систему в бассейн притяжения устойчивого нулевого состояния равновесия. Также возможны режимы, когда воздействие одного гиротрона на другой, в котором колебания отсутствуют, приводит к его возбуждению и переходу в режим взаимной синхронизации.
5. Обнаружена и исследована возможность переключения мод в системе двух связанных гиротронов. Система генераторов, связанных с

задержкой, демонстрирует мультистабильность режимов синхронизации, причем число сосуществующих режимов увеличивается с ростом времени задержки. В диссертации предложен способ переключения между этими режимами, основанный на кратковременном уменьшении тока одного из гиротронов. При этом устанавливается режим синхронизации, частота которого наиболее близка к частоте генерации второго гиротрона, и этот режим сохраняется при восстановлении тока первого гиротрона до исходного значения.

6. Было исследовано влияние конкуренции мод на режимы синхронизации внешним гармоническим сигналом гиротрона. На примере двухмодовой модели гиротрона для типичного случая, когда рабочая мода лежит в области жесткого возбуждения, а паразитная в области мягкого возбуждения, показано, что при увеличении амплитуды внешнего воздействия вначале происходит бифуркация, в результате которой бассейн притяжения основной моды увеличивается и начинает захватывать окрестность начала координат, т.е. переход в режим синхронизации возможен даже при отсутствии начальных колебаний рабочей моды. При дальнейшем увеличении амплитуды внешнего сигнала происходит полное подавление колебаний паразитной моды и остается единственное устойчивое состояние, соответствующее синхронизованным колебаниям рабочей моды.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Результаты работы представлялись на следующих школах, семинарах и конференциях:

- The 20th International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2019), Busan, Korea, 2019;
- 3rd International Conference Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications (TERA-2018), НижнийНовгород, 2018;

- XVIII Научная школа «Нелинейные волны – 2018», Нижний Новгород, 2018;
- Международные научно-технические конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП 2018, АПЭП 2016), Саратов, 2016, 2018 гг.;
- XVII Зимняя школа-семинар по СВЧ электронике и радиофизике, Саратов, 2018;
- VI Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, 2017;
- 10th International Workshop “Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications”, НижнийНовгород – Москва, 2017;
- III Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы СВЧ электроники им. В.А. Солнцева 2017», Москва, 2017;
- Международные конференции «SaratovFallMeeting», Саратов, 2017, 2016;
- 11-я Международная школа «Хаотические автоколебания и образование структур» (ХАОС-2016)

Результаты также докладывались на научных семинарах факультета нелинейных процессов СГУ и на заседаниях Саратовского отделения общества IEEE.

Публикации автора по теме диссертации в журналах, включенных в перечень ВАК:

1. Адилова А.Б., Герасимова С.А., Рыскин Н.М. Бифуркационный анализ взаимной синхронизации двух генераторов с запаздыванием в цепи связи // Нелинейная динамика. 2017. Т. 13. № 1. С. 3-12. DOI: 10.20537/nd1701001
2. Адилова А.Б., Рыскин Н.М. Исследование синхронизации в системе двух гиротронов с запаздыванием в канале связи на основе модифицированной квазилинейной модели // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2018. Т. 26, № 6. С. 68-81. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-6-68-81

3. Адилова А.Б., Преображенская Н.В., Рыскин Н.М. К теории синхронизации двухмодового электронного мазера с жестким возбуждением // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. 2019. Т. 19, № 1. С. 19-27. DOI: 10.18500/1817-3020-2019-19-1-19-27

Статьи в изданиях, индексируемых в Scopus, WebofScience:

4. Adilova A.B., Gerasimova S.A., Melnikova M.M., Tyshkun A.V., Rozhnev A.G., Ryskin N.M. Using phase locking for improving frequency stability and tunability of THz-band gyrotrons // Proc. SPIE. 2018. Vol. 10717. Art. 135. DOI: 10.1117/12.2315157.
5. Adilova A.B., Gerasimova S.A., Ryskin N.M. Synchronization of delay-coupled gyrotron oscillators // European Physical Journal Web of Conferences. 2017. Vol. 149, 04029. DOI: 10.1051/epjconf/201714904029.
6. Adilova A.B., Ryskin N.M. Study of mutual phase locking of two gyrotrons coupled with delay // European Physical Journal Web of Conferences. 2018. Vol. 195. No. 6. 01001. DOI: 10.1051/epjconf/201819501001.
7. Адилова А.Б., Герасимова С.А., Рыскин Н.М. Взаимная синхронизация двух гиротронов, связанных с задержкой // Актуальные проблемы электронного приборостроения. Материалы научно-технической конференции. Саратов: СГТУ, 2016. Т. 1. С. 5-8. DOI: 10.1109/APEDE.2016.7878839
8. Адилова А.Б., Мельникова М.М., Преображенская Н.В., Рыскин Н.М. Влияние конкуренции мод на процессы синхронизации в гиротроне // Актуальные проблемы электронного приборостроения. Материалы международной научно-технической конференции. Саратов: СГТУ, 2018. Т. 1. С. 201-205. DOI: 10.1109/APEDE.2018.8542250.
9. Adilova A.B., Gerasimova S.A., Ryskin N.M. Mutual phase locking of two gyrotrons coupled with delay // 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Copenhagen, Denmark, 2016. P. 1-2, DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2016.7758516

10. Adilova A.B., Gerasimova S.A., Ryskin N.M. Study of interaction of two gyrotrons with time-delay coupling // 2017 Eighteenth International Vacuum Electronics Conference (IVEC). London, United Kingdom, 24-26 April 2017. 2 p. DOI: 10.1109/IVEC.2017.8289706