

ОТЗЫВ

официального оппонента 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»

Вопросы синхронизации автоколебательных систем интересны как в связи с явлениями синхронизации в природных системах (на масштабах от популяций до клеток тканей отдельных органов или систем экспрессии генов), так и в связи с техническими приложениями, где может требоваться синхронная работа ансамбля генераторов. В последнем случае одной из типичных проблем является сложение мощностей: необходимость такого сложения может быть связана как с конструкционной целесообразностью (дешевизной небольшого типового генератора и т.п.), так и с принципиальной проблемой падения КПД генераторов при повышении мощности (например, гиротронов).

Для реальных систем типична некоторая протяженность в пространстве и возникновение дополнительного временного масштаба — времени распространения взаимодействий в пределах системы. Например, для клеток это может быть связано с распространением диффузионных фронтов; многие приборы в квантовой или вакуумной электронике имеют в своем составе резонатор или волновод. Проблема синхронизации автоколебаний таких систем оказывается зависящей от соотношения времен автоколебаний и возможного запаздывания в самих системах или каналах связи между ними. Последний фактор существенно обогащает и усложняет базовую картину явления синхронизации по сравнению с той «простой» универсальной картиной, которая следует из уравнения Адлера.

Здесь отдельно можно выделить вопросы поведения связанных микроволновых генераторов, используемых в системах сложения мощностей. Причем речь можно вести не только о синхронизации их работы, но и о возможности подавления паразитных мод в индивидуальных генераторах за счет связи с ансамблем аналогичных элементов.

Вышеперечисленное определяет актуальность диссертационной работы А.Б. Адиловой «Влияние запаздывания в канале связи на синхронизацию связанных автогенераторов с предельным циклом» как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения.

Рассматриваемая диссертационная работа состоит из введения, трех оригинальных глав и заключения. Объем диссертации составляет 132 страниц. Работа включает 58 рисунков. Список литературы содержит 99 наименований.

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

В первой главе проводится бифуркационный анализ явлений синхронизации в системе двух связанных осцилляторов с предельным циклом при мягком характере возбуждения колебаний. В приближении малого времени запаздывания и слабой связи бифуркационная кар-

та строится аналитически в рамках фазового описания. Далее поэтапно вводятся усложняющие факторы. Система исследуется численно в амплитудно-фазовом приближении: для изохронных осцилляторов и с учетом неизохронности. Затем учитывается конечность времени запаздывания.

Во второй главе программа исследований первой главы осуществляется для более сложного и богатого случая жесткого возбуждения автоколебаний. Здесь оказываются возможными не только режимы синхронизации автоколебаний, но и устойчивые режимы доминирования одного из генераторов, а при определенных начальных условиях — «гибель» колебаний в обоих генераторах.

В третьей главе исследуется взаимная синхронизация двух гиротронов. Предлагается и анализируется модифицированная квазилинейная (по полю) модель. Точность данной модели проверяется путем сопоставления с результатами нестационарной теории гиротрона с фиксированной структурой высокочастотного поля. Далее, на базе первой модели проводится бифуркационный анализ в случае малого времени запаздывания как для мягкого, так и для жесткого возбуждения. Исследуется управляемое переключение между различными режимами синхронизации. Рассмотрена конкуренция мод в гиротроне и ее влияние на процессы синхронизации. В частности, выявляется возможность использования синхронизации гиротронов для улучшенного подавления паразитной моды.

В третьей главе полнота академического исследования задачи сочетается с оценками параметров реальных приборов и показывается, что результаты работы актуальны при стандартной на сегодняшний день конструкционной точности гиротронов.

Особо следует отметить хорошую структуру диссертационной работы. Переход «от простого к сложному» выстроен очень продуктивно. Системы связанных гиротронов или иных автоколебательных осцилляторов, имеющих в своем составе элемент с распределенными параметрами, являются чрезвычайно сложными и многопараметрическими. Это усложняет их систематическое всеобъемлющее исследование, а также выявление базовых механизмов тех или иных нелинейных явлений в их динамике. В работе на первом этапе для систем с мягким (в первой главе) и жестким (во второй главе) возбуждением проводится аналитическое исследование бифуркационной картины в случае слабой связи и малого времени запаздывания. Отмечу, что вблизи порога возбуждения данный анализ является не приближением, а математически строгим (для случая жесткого возбуждения дополнительно требуется близость к точке смены характера бифуркации с жесткого на мягкий). Аналитическая теория позволяет явно видеть механизмы наблюдаемых явлений и идентифицировать, какие параметры чем управляют. Далее учитывается конечность времени запаздывания и строится бифуркационная картина с учетом распределенного характера компонентов системы. При этом наблюдается преемственность структуры полной бифуркационной картины и есть возможность интерпретировать те или иные усложняющие факторы через эффективную корректировку простых «первопринципных» параметров. В третьей главе описывается и моделируется уже динамика конкретных физических систем, для которых выявляется упрощенная математическая модель, воспроизводящая подлинную динамику с достаточной точностью. В рамках этой модели удается получить бифуркационные картины, вновь демонстрирующие

преимущество по отношению к результатам аналитической теории. Благодаря чему можно делать выводы о механизмах нелинейных явлений, когда это уместно, интерпретировать влияние осложняющих факторов через модуляцию «первопринципных» параметров и, что особенно важно, полагаться на полноту построенной картины. Вопрос полноты описания возможных режимов требует внимания в связи с тем, что полное детальное «сканирование» пространства параметров многопараметрической системы в численном моделировании систем с распределенными параметрами невозможно.

Резюмируя, исследования в работе проведены систематически и основательно, с надлежащим подбором методов. Сочетание аналитических методов и численного моделирования показывает квалификацию автора.

У оппонента по работе возникли исключительно технические вопросы и замечания:

(1) Стр. 28, 3-4 строка: не удалось найти, где численные результаты показаны на рис. 1.6(в) кружками. Но таковые имеются на рис. 1.7 и они дают нужную информацию, подкрепляющую выводы в тексте.

(2) Стр. 36, 3я строка: «рождаются неустойчивая точка А». Кроме опечатки в окончании, также представляется, что рождается *устойчивая* точка.

(3) Стр. 45, 3-5я строки снизу: «При $\rho \approx 0.459$ происходит бифуркация рождения пары предельных циклов (устойчивого C_S и неустойчивого C_U) из сгущения фазовых траекторий.» Не понятен смысл этой формулировки с точки зрения бифуркационного анализа. Что имеется в виду?

(4) Стр. 98, рис.: Поскольку (об этом пишет и автор) при нормировке, выбранной в главе 3, параметр связи не может быть больше 1, было бы уместно явно отметить на графиках уровень $\rho = 1$.

(5) В работе имеется некоторое количество опечаток. Например, стр. 13, 9ая строка снизу: «имеет»; стр. 16, 10я строка снизу: «. т.е.»; стр. 18, 9ая строка: окончания; стр. 25, подпись к рисунку: потеряно «л»; стр. 31: «В случае в случае»; и т.д.

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

Отмеченные замечания не влияют на общее положительное впечатление от работы А.Б. Адиловой, 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. Материалы работы достаточно полно отражены в 25 публикациях, из которых 13 – в журналах, входящих в перечни ведущих рецензируемых и зарубежных научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук. Результаты докладывались на представительных российских и международных конференциях. Несомненно, автор является квалифицированным специалистом в области радиофизики и сложной динамики нелинейных систем; причем способен как получать аналитические результаты, так и проводить числен-

ное моделирование. Диссертационная работа А.Б. Адиловой написана грамотным литературным языком, хорошо оформлена и является законченным научным исследованием.

Диссертационная работа «**Влияние запаздывания в канале связи на синхронизацию связанных автогенераторов с предельным циклом**» удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13 и 14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, **Адилова Асель Булатовна**, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **01.04.03 – Радиофизика**.

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

Ст.н.с. группы Динамики геологических систем
Института механики сплошных сред УрО РАН
канд. физ.-мат. наук

Денис Сергеевич Голдобин

04.12.2020

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

Подпись Голдобина Дениса Сергеевича заверяю

« 4 » декабря 2020 г.

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



Н.А. Юрлова