

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Астахова Олега Владимировича
«МУЛЬТИСТАБИЛЬНОСТЬ, КВАЗИПЕРИОДИЧНОСТЬ И ХАОС В
МНОГОМОДОВЫХ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ,
ПОСТРОЕННЫХ НА БАЗЕ ОСЦИЛЛЯТОРА ВАН ДЕР ПОЛЯ»,
представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика.

Диссертационная работа Астахова О.В. посвящена исследованию условий возникновения квазипериодических и хаотических колебаний, выявления бифуркационных закономерностей формирования мультистабильности в автоколебательных системах, построенных на базе осциллятора Ван дер Поля при последовательном увеличении числа степеней свободы. Работа носит в первую очередь фундаментальный характер и является актуальной в настоящее время.

Явлению возбуждения хаотических колебаний в нелинейных динамических системах посвящено огромное число работ. К настоящему времени достаточно полно изучены бифуркационные механизмы рождения квазипериодических и хаотических колебаний в трехмерных системах. При этом для систем большей размерности подробное изучение этих процессов либо отсутствует, либо представляет значительные трудности. В диссертационной работе Астахова О.В. проведено подробное исследование бифуркационных механизмов рождения квазипериодических и хаотических колебаний, а также формирования мультистабильности в автоколебательных системах при увеличении числа степеней свободы. В радиофизических автогенераторах этого можно добиться за счет увеличения количества контуров обратной связи. При этом как способ введения дополнительных колебательных систем, так и механизмы реализации связей между ними остаются одновременно важными и слабо изученными вопросами в контексте поставленной задачи. Интерес к подобным исследованиям с одной стороны обусловлен фундаментальной значимостью с позиции теории

бифуркаций, с другой стороны, представленное исследование носит прикладной характер, связанный с изучением так называемых многомодовых автогенераторов, к которым, как отмечает соискатель, относятся электронно-волновые и полупроводниковые источники СВЧ, суб-терагерцового и терагерцового диапазонов. Все вышесказанное позволяет считать тему диссертационной работы актуальной. Содержание работы полностью соответствует паспорту специальности 01.04.03 – радиофизика.

При выполнении диссертационной работы автор решил логически связанный круг задач: каждая глава диссертации расширяет и дополняет результаты, изложенные в предыдущих главах. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы и содержит 139 страниц, включая 28 рисунков, список литературы из 124 наименований.

Введение посвящено обоснованию актуальности, новизны и практической значимости круга решаемых задач, описываются цель и тема исследования, формулируются положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** подробно описаны бифуркационные механизмы формирования мультистабильности и гистерезиса в генераторе Ван дер Поля при наличии дополнительного колебательного контура с индуктивной связью. Бифуркационный анализ, проведенный автором на основе рассмотрения полной системы уравнений, а также системы укороченных уравнений для амплитуд и фаз, показал, что эффекты бистабильности и гистерезиса обусловлены сосуществованием в узкой области управляющего параметра системы двух устойчивых предельных циклов, имеющих различную амплитуду и частоту и рождающихся через последовательность суперкритической бифуркации Андронова-Хопфа и субкритической бифуркации Неймарка-Сакера.

Вторая глава посвящена исследованию мультистабильности и возбуждению хаоса в генераторе Ван дер Поля и двух линейных колебательных контурах. Было обнаружено, что в по сравнению с моделью, в

которой цепь обратной связи содержит лишь один линейный осциллятор, включение двух контуров приводит к более сложным динамическим режимам: вместо эффекта затягивания частоты наблюдаются квазипериодические колебания и переход к хаосу через последовательность бифуркаций удвоения тора.

В третьей главе исследованы сложные режимы динамики кольцевого генератора с тремя линейными контурами, а также в многомодовом генераторе с пятью нелинейными контурами. Проведенный бифуркационный анализ показал, что добавление третьего линейного осциллятора в цепь обратной связи увеличивает многообразие наблюдаемых мультистабильных состояний, включая режимы периодических, квазипериодических и хаотических колебаний. В модели многомодового генератора с пятью нелинейными контурами было обнаружено рождение квазипериодических орбит с двумя, тремя и четырьмя независимыми частотами, а также режима гиперхаоса с двумя положительными показателями Ляпунова.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационного исследования.

Среди наиболее значимых с научной точки зрения результатов отметим следующие:

- Были выявлены бифуркационные закономерности формирования бистабильности, сопровождаемой эффектами затягивания частоты и гистерезиса, в классическом генераторе Ван дер Поля при возбуждении дополнительной моды;
- Показано, что в генераторе Ван дер Поля с дополнительной колебательной системой бифуркационный механизм формирования мультистабильности не зависит от типа связи между колебательными системами автогенератора;
- Показано, что в генераторе Ван дер Поля с двумя колебательными контурами в канале обратной связи возможны режимы хаотических

колебаний, переход к которым происходит через последовательность бифуркаций удвоения торов;

- Показано, что добавление линейных колебательных контуров в канал обратной связи приводит к более развитой мультистабильности – в генераторе появляются дополнительные семейства периодических, квазипериодических и хаотических режимов, сосуществующие в фазовом пространстве системы;
- Установлено, что бифуркационный механизм формирования мультистабильности в генераторе с тремя колебательными контурами в цепи обратной связи является таким же как и бифуркационный механизм явления затягивания частоты в генераторе Ван дер Поля с дополнительным колебательным контуром;
- Продемонстрировано, что в многомодовом генераторе, состоящем из пяти нелинейных колебательных контуров с многоканальной системой обратных связей, возможно возбуждение двух-, трех-, четырехчастотных квазипериодических колебаний и переходы к режимам хаоса и гиперхаоса.

Результаты работы обладают несомненной **научной и практической** значимостью. Они значительным образом расширяют и дополняют имеющиеся знания в области радиофизики относительно сложной динамики нелинейных автоколебательных систем с обратной связью. Автором работы был впервые проведен детальный бифуркационный анализ формирования мультистабильности и рождения хаотических колебаний в многомодовом генераторе Ван дер Поля с линейными контурами обратной связи, а также показаны условия формирования более сложных мультистабильных режимов и режима гиперхаоса при добавлении нелинейных контуров. Изложенные результаты могут быть использованы для более глубокого понимания генерации хаоса в полупроводниковых системах, нагруженных на линейный резонатор, или для формирования устойчивого СВЧ и терагерцового излучения в многомодовых генераторах гиротронного типа.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов диссертационной работы подтверждается качественным соответствием численных исследований с результатами аналитических выводов, использованием отработанных численных методов решений обыкновенных дифференциальных уравнений, а также отсутствием противоречий с известными в литературе результатами.

Имеются отдельные замечания по содержанию и оформлению работы, которые, однако, не носят принципиального характера и не затрагивают существа защищаемых положений и выводов диссертации. А именно:

1. В тексте имеются ошибки и опечатки.
2. Считаю, что использование термина “многоканальный” в названии раздела 3.3 и его подразделов не совсем корректно, поскольку в контексте диссертационной работы наиболее подходящим был бы термин “многомодовый”.
3. Система обозначений параметров связи в математической модели (3.13) и система обозначений тех же параметров связи в экспериментальной системе (рис.3.12) отличаются, что затрудняет их сопоставление.

В целом, диссертация Астахова Олега Владимировича представляет собой законченное исследование, диссертационная работа производит хорошее впечатление, написана хорошим научно–техническим языком, является законченным научным исследованием, выполненным на актуальную для радиофизики тему. Стоит отметить, что сложность решаемых задач свидетельствует о высокой квалификации автора, получившего новые и интересные результаты.

Результаты диссертации достаточно полно представлены публикациями в отечественных научных журналах, рекомендованных ВАК, авторитетных мировых научных изданиях (Chaos, International Journal of Bifurcation and Chaos), а также в докладах международных и российских

научных конференций. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Можно заключить, что диссертация Астахова Олега Владимировича по актуальности решенных задач, объему проведенных исследований, степени научной новизны и практической значимости результатов полностью удовлетворяет требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Астахов О.В. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика».

Кандидат физико-математических наук,

старший научный сотрудник

Лаборатории нейронауки и когнитивных технологий

АНО ВО «Университет Иннополис»

Фролов Н.С.

26 февраля 2021 г.

Адрес места работы: АНО ВО «Университет Иннополис», 420500, респ. Татарстан, г. Иннополис, ул. Университетская, 1;

Тел.: +7 986 994 20 35

email: n.frolov@innopolis.ru

Научные специальности кандидатской диссертации Фролова Никиты Сергеевича – 01.04.03 – Радиофизика и 01.04.04 – Физическая электроника.

Подпись к.ф.-м.н. Фролова Никиты Сергеевича удостоверяю

Директор по развитию и кадровой политике
Кашев Р.Т.

