



«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «Юго-Западный
государственный университет»,
д.т.н., профессор
Л.М. Червяков
«25» января 2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Юго-Западный государственный университет», на диссертацию Чернышова Николая Юрьевича «Синхронизация реактивно связанных осцилляторов Ван дер Поля», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 - радиофизика.

Диссертационная работа Чернышова Николая Юрьевича посвящена актуальной задаче радиофизики – синхронизации низкоразмерных ансамблей реактивно связанных осцилляторов. Работа представляет собой теоретическое исследование, выполненное с использованием аналитических и численных методов. В качестве парциального элемента выбран осциллятор Ван дер Поля, представляющий собой одну из базовых моделей радиофизики и теории колебаний. Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию ансамблей связанных осцилляторов, многие аспекты динамики таких систем остаются мало изученными. Даже в самом простом случае, когда связаны два осциллятора, наблюдается разнообразная картина возможных эффектов: взаимный захват осцилляторов с различным соотношением частот, двухчастотные квазипериодические колебания и т.д. При увеличении числа элементов в ансамбле или добавлении внешнего периодического воздействия картина синхронизации становится более сложной. В этом случае возможны не только двухчастотные, но и трехчастотные колебания, а также колебания с большим числом несоизмеримых частот и хаос.

Так же одним из важных является вопрос о типе связи между парциальными осцилляторами. Если случай диссипативной связи исследован довольно хорошо, то случай реактивной изучен в гораздо меньшей степени. Во многом это связано с необходимостью учета квадратичных слагаемых по параметру связи при выводе фазовых уравнений, а так же с наличием в системе мультистабильности.

Таким образом, тема диссертационной работы Чернышова Н. Ю. является актуальной и практически важной.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитированной литературы.

Во **введении** обосновывается актуальность работы, определяются цели исследования, ставятся основные задачи, раскрывается научная новизна и значимость полученных результатов, а также формулируются положения и результаты, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена исследованию динамики двух реактивно связанных осцилляторов Ван дер Поля, один из которых возбуждается внешним гармоническим сигналом. Аналитически получены фазовые уравнения, учитывающие квадратичные по

параметру связи слагаемые. Динамика фазовой модели подробно исследована аналитически и численно: выявлены бифуркации не только коразмерности один (бифуркация Андронова-Хопфа и село-узловая бифуркация инвариантных кривых), но и коразмерности два (точки Богданова-Такенса, вырожденные точки сборки). Исследована плоскость частота - амплитуда внешнего воздействия методом карт ляпуновских показателей. С помощью этого метода в пространстве параметров выявлены области периодических режимов, двух- и трехчастотных квазипериодических колебаний. Методом ляпуновских показателей исследована система исходных дифференциальных уравнений (1.1) и выявлено, что в отличие от фазовой модели (1.19), в пространстве параметров наблюдаются не только периодические и квазипериодические режимы, но и хаотические колебания. Указаны области в пространстве параметров, в которых фазовое приближение достаточно адекватно описывает динамику исходной системы.

Во **второй** главе исследуется цепочка трех реактивно связанных осцилляторов. Так же как и в первой главе для нее построена фазовая модель. Аналитически показано, что фазовые уравнения обладают лучевой симметрией.

В пространстве параметров найдены области различных типов синхронизации: синфазной, противофазной и смешанной. Для каждого из них построены характерные фазовые портреты. Показана возможность бистабильности, когда квазипериодические режимы сосуществуют с режимом синхронизации. Проведено сопоставление со случаем диссипативной связи и найдены основные отличия, состоящие в том, что меняется бифуркационная картина (седло-узловые бифуркации происходят на разных линиях, появляются новые бифуркации, такие как точки сборки, бифуркация Андронова-Хопфа и т.д.). Кроме того, обнаружена заметная зависимость бифуркационной картины от величины параметра связи.

Проведен численный бифуркационный анализ исходной системы дифференциальных уравнений (2.1). Проведено сопоставление результатов, полученных для фазовой модели и исходной системы дифференциальных уравнений. Показано, что при малых значениях параметра связи наблюдается хорошее соответствие динамики исходных уравнений с динамикой фазовой модели.

В **третьей** главе изучается динамика цепочки из трех реактивно связанных осцилляторов Ван дер Поля во внешнем гармоническом поле. Аналогично предыдущим главам для нее получены фазовые уравнения. Построены карты ляпуновских показателей и аттракторы, как для фазовой модели, так и для исходной системы дифференциальных уравнений. Найдены области синхронных, квазипериодических и хаотических режимов. При этом хаотический режим, в отличие от рассмотренных ранее моделей, наблюдается не только в исходной системе дифференциальных уравнений, но и в фазовой модели. Показано наличие мультистабильности, когда сосуществуют не только синхронные и квазипериодические режимы, но и квазипериодические режимы, отвечающие разным соотношениям частот, а так же двухчастотные режимы и хаос. Для фазовой модели построены карты торов, позволяющие классифицировать двухчастотные режимы.

В **четвертой** главе исследуется кольцо из трех реактивно связанных осцилляторов Ван дер Поля, для которого получена фазовая модель и проведен ее подробный численный бифуркационный анализ. Найдены области синхронных и квазипериодических режимов. Продемонстрирована возможность мультистабильности. Проведено сопоставление с результатами, полученными для цепочки из трех реактивно связанных осцилляторов (глава 2). Показано, что в отличие от случая цепочки, в кольце из реактивно связанных осцилляторов возможно сосуществование сразу трех синхронных режимов, а пространство параметров

системы обладает лучевой симметрией. При этом за разрушение режимов синхронизации отвечают одни и те же бифуркации. Численно исследована система исходных дифференциальных уравнений. Проведено сопоставление со свойствами фазовой модели.

Основные результаты и выводы диссертационной работы представлены в **заключении**.

Новизна научных результатов диссертационной работы состоит в следующем:

1. Фазовые уравнения систем двух и трех осцилляторов, возбуждаемых внешним гармоническим сигналом, а также соединенных в цепочку и кольцо трех реактивно связанных осцилляторов, которые качественно правильно описывают характер реализующихся динамических режимов для конкретных значений коэффициента связи.
2. Установлены особенности колебательных режимов низкоразмерного ансамбля реактивно связанных осцилляторов Ван дер Поля, состоящие в следующем:

2.1. Области квазипериодических колебаний в двумерных фазовых моделях с реактивной связью устроены в виде системы языков, встроенные в область трехчастотных колебаний. Причем реактивная связь допускает частичный захват фаз осцилляторов без непосредственной связи между собой.

2.2. В трехмерной фазовой модели трех реактивно связанных осцилляторов обнаружены области четырехчастотных режимов, в которые встроены языки трехчастотных колебаний (см., рис.3.7 на стр.120). Причем перекрытие языков трехчастотных режимов при увеличении амплитуды внешнего воздействия приводит к возникновению хаотических колебаний.

2.3. Для реактивно связанных осцилляторов, возбуждаемых внешним сигналом, и автономных систем в виде цепочки и кольца из трех элементов, бифуркационная картина отличается от той что имеет место в случае диссипативной связи, а именно: в фазовой модели с реактивной связью типична бифуркация Андронова-Хопфа, приводящая к частичной синхронизации всех осцилляторов, и отсутствуют вырожденные седло-узловые бифуркации, характерные для диссипативной связи.

Научно-практическая значимость состоит в том, что полученные результаты дополняют разделы теории колебаний, относящиеся к динамике автономных и неавтономных ансамблей, состоящих из нескольких осцилляторов Ван дер Поля. При этом выполненное исследование сочетает как аналитические, так и численные методы.

В силу универсальности использованной базовой модели, полученные результаты могут быть применены для разнообразных конкретных задач, среди которых можно указать ионные ловушки, связанные устройства микроволновой электроники, например, связанные виркаторы, различные генераторы ритмов в робототехнике.

Достоверность результатов и выводов диссертационной работы подтверждается использованием известных, апробированных численных методов, соответствием качественного описания результатам численного моделирования.

По диссертационной работе есть ряд замечаний:

- 1) Исследование проведено для формальных уравнений осцилляторов Ван дер Поля. Автор ограничивается лишь одним физическим примером – ионными ловушками. Было бы целесообразно увеличить число физических систем с инерционной связью.
- 2) В диссертации представлено подробное исследование фазовых уравнений, но не комплексных укороченных уравнений или амплитудно-фазовых приближений. Современные численные методы позволяют выполнить бифуркационный анализ как комплексных укороченных, так и амплитудно-фазовых уравнений. Такие исследования позволили бы ответить на вопрос о применимости указанных выше приближений и повысить общность полученных результатов.
- 3) Из работы непонятно, чем реактивная связь отличается от диссипативной. Сопоставление фазового приближения для этих двух типов связи дано только для цепочки трех связанных осцилляторов (глава 2).
- 4) Работа содержит многочисленные опечатки, как в формулах, так и в тексте.
- 5) Пункты “научная новизна” в диссертации (стр.8-9) и автореферате (стр.6) отличаются.

Однако, отмеченные недостатки не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Н.Ю. Чернышова.

Заключение

Диссертационная работа Н.Ю. Чернышова представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, выполненную на актуальную тему, отличается научной новизной и практической значимостью полученных результатов. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.03 - радиофизика.

По результатам проведенных исследований опубликовано 12 работ в научных изданиях, включая 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук. Автореферат в целом правильно отражает содержание диссертации.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в научных организациях, сферой деятельности которых являются исследования прикладных проблем радиофизики, теории колебаний и волн. В качестве возможных организаций следует рекомендовать Институт радиотехники и электроники РАН (г. Москва и его филиалы в Фрязино и Саратове), Институт прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород), Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН. Научно-методические результаты работы могут быть рекомендованы к внедрению в учебный процесс в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова, Нижегородском государственном университете им. Н.И.Лобачевского, Московском физико-техническом институте, Саратовском государственном университете им. Н.Г.Чернышевского, и других вузах, ведущих подготовку специалистов по радиофизическим направлениям.

Диссертационная работа Чернышова Николая Юрьевича удовлетворяет требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года, № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а сам диссертант заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 - радиофизика.

Отзыв составил:

Профессор кафедры вычислительной техники

Юго-Западного государственного

университета,

д.т.н., профессор



Жусубалиев Жаныбай Турсунбаевич

Почтовый адрес: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет»,

кафедра вычислительной техники,

тел.: 8 (4712) 22-26-65, e-mail: zhanybai@gmail.com

Отзыв утвержден на заседании кафедры вычислительной техники Юго-Западного государственного университета. Протокол № 9 от «19» января 2018 года.

Заведующий кафедрой

вычислительной техники Юго-Западного государственного

университета,

заслуженный деятель науки РФ,

д.т.н., профессор



Титов Виталий Семенович

Секретарь,

профессор кафедры

вычислительной техники Юго-Западного государственного

университета,

д.т.н.



Чернецкая Ирина Евгеньевна