

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Плотниковой Анастасии Дмитриевны

«Использование показателей Ляпунова для изучения сложной динамики и синхронного поведения в радиофизических генераторах с запаздыванием и реальных нейрофизиологических системах»,

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – «Радиофизика»

Динамика связанных нелинейных динамических систем, способных демонстрировать хаотическое поведение, достаточно интересна и разнообразна. При изменении только одного параметра, определяющего силу связи между этими системами, в них возможно возникновение различных типов хаотической синхронизации, среди которых наибольшее распространение получили режимы полной синхронизации, синхронизации с запаздыванием, обобщенной синхронизации и фазовой синхронизации. Каждый из вышеназванных типов синхронного поведения по-своему интересен и важен. Наряду с большой фундаментальной важностью изучения данной проблемы, эти типы хаотической синхронизации могут найти практическое применение, например, в информационно-телекоммуникационных системах и нейрофизиологии, что свидетельствует об актуальности и перспективности этого направления научных исследований не только для радиофизики, но и других междисциплинарных наук.

Диссертационная работа Плотниковой Анастасии Дмитриевны посвящена рассмотрению двух из вышеупомянутых типов хаотической синхронизации, а именно, режимов обобщенной и фазовой синхронизации. При этом в качестве объектов исследования выбраны сложные модельные системы, описываемые уравнениями с запаздывающим аргументом (однаправленно и взаимно связанные системы с запаздыванием), и реальные экспериментальные данные (электроэнцефалограммы человека и лабораторных животных), а в качестве основного инструмента для исследования использован расчет спектра показателей Ляпунова. Особое внимание в рамках диссертационной работы уделено разработке и апробации новых методов и подходов к расчету показателей Ляпунова для таких систем. Диссертационная работа характеризуется органичным сочетанием фундаментальных аспектов изучаемого явления и их возможных приложений и полностью соответствует специальности 1.3.4. – радиофизика.

Диссертация (общий объем 104 стр., включая 29 иллюстраций и 2 таблицы) состоит из введения, трех глав и заключения. Список литературы содержит 162

наименования. Диссертационная работа имеет логично организованную структуру, характеризуется последовательным изложением результатов и качественным графическим оформлением.

Во **введении** автором обоснована актуальность темы диссертации, четко сформулирована цель диссертационной работы и определены основные задачи исследования, позволяющие достичь сформулированной цели, представлено описание научной новизны, теоретической и практической значимости полученных результатов, приведены аргументы в пользу их достоверности, сформулированы три положения, выносимых на защиту, приведены сведения об апробации результатов и публикациях.

Оригинальный материал диссертационного исследования изложен в трех главах. Логика каждой главы подчиняется одному и тому же принципу: в начале главы дается краткий обзор известных результатов по изучаемому вопросу, а затем излагаются оригинальные результаты, полученные диссертантом.

Так, в **первой главе** рассмотрен вопрос о применении показателей Ляпунова для анализа сложной динамики и синхронного поведения в системах с запаздыванием. В этой главе представлен краткий обзор существующих методов и подходов для вычисления спектра показателей Ляпунова в сосредоточенных и распределенных системах, отмечены их достоинства и недостатки, определена необходимость разработки новых методов и модификации существующих подходов применительно к системам с запаздыванием. Далее рассмотрен предложенный в рамках диссертационной работы новый метод расчета спектра показателей Ляпунова для систем с запаздыванием. Метод представляет собой модификацию алгоритма Бенеттина и процедуры ортогонализации Грама-Шмидта, хорошо известных и активно используемых для сосредоточенных систем и в последствии адаптированных на пространственно-распределенные среды. Апробация метода проведена на одномерных системах с запаздыванием, генераторе с запаздыванием и уравнении Маккея-Гласса. Для обеих систем наряду со спектром показателей Ляпунова построены бифуркационные диаграммы при изменении одного из управляющих параметров систем и фазовые портреты при различных значениях этих параметров, получено хорошее соответствие полученных режимов с сигнатурой спектра показателей Ляпунова для обеих систем.

Вторая глава является продолжением первой главы диссертации. В ней предложенный метод расчета спектра показателей Ляпунова для систем с запаздыванием адаптирован и применен для исследования режима обобщенной синхронизации в тех же генераторах с запаздыванием и уравнениях Маккея-Гласса, но связанных однонаправленно и взаимно. В начале главы представлены известные

теоретические сведения о режиме обобщенной синхронизации и методах его диагностики, далее проведена апробация предложенного подхода на однонаправленно связанных системах, допускающих анализ обобщенной синхронизации также при помощи метода вспомогательной системы, получено хорошее соответствие обоих методов при различных значениях управляющих параметров взаимодействующих систем, отвечающих за различное число положительных показателей Ляпунова, реализуемых в этих системах в отсутствие связи между ними, выявлены закономерности установления обобщенной синхронизации в зависимости от значений этих управляющих параметров. Далее в этой главе предложенный метод расчета спектра показателей Ляпунова применен к системам с взаимной связью. Обнаружены схожие изменения в спектре показателей Ляпунова в данном случае. Найдена универсальная закономерность зависимости порога установления обобщенной синхронизации от времени запаздывания, характерная для обоих типов связи между системами.

Третья глава посвящена изучению фазовой синхронизации и перемежающегося поведения, имеющего место вблизи ее границы, в модельных и реальных нейрофизиологических системах. Как и предыдущие две главы, эта глава начинается с краткого обзора известных результатов в данной области. Здесь не только дано определение самого феномена и описаны методы диагностики этого режима, но и представлены результаты численного моделирования двух однонаправленно связанных систем Ресслера, доказывающие существование перемежаемости вблизи границы фазовой синхронизации и эргодичность этого процесса. Далее в этой главе предложен метод оценки нулевого условного показателя Ляпунова по временному ряду, позволяющий определить степень синхронизма режима перемежающейся фазовой синхронизации. Метод апробирован на модельном квадратичном отображении и впоследствии применен к реальным экспериментальным сигналам – электроэнцефалограммам крыс линии WAG/Rij и человека, страдающего эпилепсией. Для крыс произведена оценка степени синхронизма перемежающейся фазовой синхронизации как в свободном состоянии, так и под действием лекарственного препарата. Обнаружена более высокая степень синхронизма приступов эпилепсии крысы, находящейся под действием лекарства. По данным электроэнцефалографии человека установлено, что пик-волновые разряды обладают более высокой степенью синхронизма по сравнению с синхронными участками фоновой активности головного мозга.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Наиболее важными результатами диссертационной работы, на мой взгляд, являются следующие:

1. Предложенные методы расчета спектра показателей Ляпунова в системах с запаздыванием и реальных нейрофизиологических системах. Эти методы могут найти широкое применение на практике при обработке сигналов различной природы.
2. Обнаруженные универсальные закономерности установления обобщенной синхронизации в однонаправленно и взаимно связанных системах с запаздыванием.
3. Результаты анализа перемежающейся фазовой синхронизации в реальных нейрофизиологических системах.

Научные результаты, изложенные в диссертационной работе, являются новыми и оригинальными, что подтверждается их публикацией в ведущих отечественных и зарубежных научных журналах с высоким импакт-фактором, индексируемых международными базами данных (Web of Science, Scopus) и Russian Science Citation Index. Среди научных работ, опубликованных соискателем, присутствуют статьи в таких известных журналах как «Chaos, Solitons & Fractals», «Письма в журнал технической физики», «Известия РАН. Серия физическая», «Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика», что подтверждает высокий уровень научных результатов, полученных соискателем.

Достоверность и обоснованность научных результатов и выводов, приведенных в диссертации А.Д. Плотниковой и прошедших апробацию на различных международных и всероссийских научных конференциях, обеспечиваются адекватностью выбранных классических математических моделей и базовых методов для их решения и исследования, согласованностью результатов, полученных при помощи различных методов и подходов, а также качественным (а в ряде случаев и количественным) совпадением полученных результатов с отдельными результатами исследований, известными из литературы.

По диссертации имеется ряд замечаний:

1. В первой главе диссертационной работы при проверке работоспособности предложенного автором метода расчета спектра показателей Ляпунова для систем с запаздыванием проводится сопоставление спектра показателей Ляпунова, рассчитанного для нескольких модельных систем с запаздыванием, с бифуркационными деревьями, полученными для тех же систем. При этом автор не обсуждает детали численного моделирования, например, как выбиралась секущая плоскость, чем обоснован ее выбор, шаг численного счета и т.д. Также можно было провести для сравнения численный бифуркационный анализ в каком-либо пакете прикладных программ, например Content, XPPAUT и другие. Обсуждение данных

вопросов послужило бы хорошим дополнением данной главы, а также послужило бы дополнительной проверкой достоверности разработанного метода расчета показателей Ляпунова.

2. Помимо показателей Ляпунова существуют другие характеристики, которые в некоторой степени рассчитываются исходя из тех же подходов, но направленные на решение каких-то сложностей, связанных с расчетом спектра показателей Ляпунова (например, по временному ряду без модели), которыми также можно охарактеризовать динамические режимы, наблюдающиеся в системах. В недавней книге, представляющей собой сборник статей: Skokos, C.H., Gottwald, G.A. and Laskar, J. eds., 2016. *Chaos Detection and Predictability* (Vol. 1). Berlin: Springer, представлен обзор различных характеристик и методов их расчета. Какие-то из рассматриваемых характеристик могли бы быть востребованными для анализа обобщенной синхронизации. Обзор характеристик хорошо бы дополнил первую главу. К сожалению, в диссертации отсутствует сравнительный анализ с другими характеристиками.

3. Как показывают результаты первой главы диссертации, в автогенераторе с запаздыванием в отсутствие связи возможна реализация режимов с достаточно большим числом положительных показателей Ляпунова. При этом, в рамках второй главы автор ограничивается рассмотрением только режимов с одним и двумя положительными показателями для такой системы. Возникает вопрос, сохраняются ли выявленные закономерности установления режима обобщенной синхронизации в случае взаимодействия генераторов с запаздыванием с большим числом положительных показателей Ляпунова?

Указанные замечания не снижают общего положительного впечатления от диссертационной работы. Диссертация Плотниковой А.Д. представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, в которой получен ряд интересных и важных результатов, существенно дополняющих разделы радиофизики в части теории колебаний и волн, нелинейной динамики.

По результатам диссертационной работы опубликовано 7 статей в центральных рецензируемых отечественных и зарубежных научных журналах, входящих в международные базы данных Web of Science и Scopus, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук: *Chaos, Solitons & Fractals*», «Письма в журнал технической физики», «Известия РАН. Серия физическая», «Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика» и др. Получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ на разработанные автором и используемые при выполнении диссертационной работы программные комплексы.

Результаты диссертационной работы были широко представлены на различных международных и всероссийских конференциях, по материалам которых опубликовано 10 статей в материалах этих конференций.

Научные положения и выводы, представленные в диссертации, являются обоснованными и могут быть рекомендованы к использованию в исследованиях фундаментального и прикладного характера как в области радиофизики, так и других смежных наук, опирающихся на обработку экспериментальных данных. Автореферат содержит всю необходимую информацию и адекватно отражает содержание диссертации.

Таким образом, считаю, что диссертационная работа Плотниковой Анастасии Дмитриевны вносит важный вклад в область радиофизики, связанную с применением показателей Ляпунова для изучения динамики сложных связанных систем, демонстрирующих синхронное поведение. Работа удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13, 14 действующего «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Плотникова Анастасия Дмитриевна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «1.3.4 – радиофизика».

Официальный оппонент

Старший научный сотрудник лаборатории топологических методов в динамике Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», г. Нижний Новгород, кандидат физико-математических наук (01.04.03 - радиофизика), доцент

Станкевич Наталия Владимировна

«02» сентября 2022 г.

Почтовый адрес: 603155, г. Нижний Новгород, Б. Печерская ул., д. 25/12, телефон: +7(903)3290994, e-mail: stankevichnv@mail.ru

Подпись Станкевич Н.В. заверяю



Н.В. Станкевич
И.В. Станкевич
И.В. Станкевич