



«ДУТВЕРЖДАЮ»

Профессор по научной работе

ИИГУ им. Н.И. Лобачевского

д.ф.-м.н., доцент Иванченко М.В.

15 сентября 2022 г.

О Т З Ы В

ведущей организации федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» на диссертацию 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

Диссертационная работа Плотниковой Анастасии Дмитриевны посвящена изложению результатов исследования различных типов хаотической синхронизации в сложных модельных и реальных системах. Это направление научных исследований представляется в настоящее время актуальным и перспективным, привлекающим пристальное внимание как отечественных, так и зарубежных ученых, работающих не только в области радиофизики, но и в других смежных областях современной науки. В то же самое время, несмотря на наличие очень большого количества активно цитируемых работ в данной области, все еще остаются нерешенными некоторые вопросы, связанные с изучением хаотической синхронизации и явлений, имеющих место вблизи границ различных ее типов. В настоящей диссертационной работе особое внимание уделено изучению особенностей режима обобщенной хаотической синхронизации в радиофизических генераторах с запаздыванием и перемежающейся фазовой синхронизации в реальных нейрофизиологических системах. Основным инструментом для анализа данных режимов в работе выбран расчет спектра показателей Ляпунова, для чего в работе предложены новые методы и подходы. Разработанные методы имеют большой потенциал практического применения и в перспективе могут быть использованы для решения широкого круга прикладных задач. В частности, метод оценки степени синхронизма перемежающейся фазовой синхронизации, основанный на расчете нулевого условного показателя Ляпунова по временному ряду, может найти применение при обработке экспериментальных данных различной (например, радиотехнической и медикобиологической) природы. Так предложенный метод расчета спектра показателей Ляпунова для систем с запаздыванием может использоваться на практике в системах

скрытой передачи информации на основе обобщенной синхронизации. Вышесказанное свидетельствует об актуальности и практической значимости темы диссертационного исследования Плотниковой А.Д.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованной литературы. Она имеет логично организованную структуру и характеризуется четким и ясным изложением материала.

Во **введении** обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулирована цель диссертационной работы, описаны научная новизна, личный вклад, научная и практическая значимость полученных результатов. Введение содержит основные положения и результаты, выносимые на защиту, информацию о структуре и объеме работы, сведения о достоверности полученных результатов, их апробации и публикациях.

Содержательную часть диссертации можно условно разделить на две части. Первая часть, состоящая из двух глав, посвящена разработке методов анализа сложной динамики и синхронного поведения в системах с запаздыванием и анализу особенностей обобщенной синхронизации при помощи разработанных подходов, в то время как во второй части, состоящей из третьей главы, рассматриваются методы и результаты анализа фазовой и перемежающейся фазовой синхронизации в реальных нейрофизиологических системах. В начале каждой главы представлен краткий обзор известных результатов в данной области исследования, а далее изложены оригинальные результаты, полученные соискателем. Остановимся на изложении этих результатов по главам чуть более подробно.

В **первой главе** предложен метод расчета спектра показателей Ляпунова для систем с запаздыванием и проведена его апробация на модельных одномерных системах. В качестве объектов исследования выбраны радиофизический генератор с запаздыванием и модель Маккея-Гласса. Для обеих систем построены зависимости девяти старших показателей Ляпунова от одного из управляющих параметров, а также соответствующие им бифуркационные диаграммы и фазовые портреты при отдельных значениях управляющих параметров. Получено хорошее соответствие полученных результатов друг с другом.

Во **второй главе** предложенный метод применен для исследования особенностей обобщенной синхронизации в двух однонаправленно и взаимно связанных системах с запаздыванием. В качестве объектов исследования выбраны те же генераторы с запаздыванием и уравнения Маккея-Гласса, связанные друг с другом. Апробация метода проводилась на однонаправленно связанных системах, допускающих диагностику этого режима также при помощи метода вспомогательной системы. Показано, что для всех рассмотренных систем оба метода диагностируют наступление синхронного режима при одинаковых значениях параметра связи, при этом порог обобщенной синхронизации сильно зависит от значений управляющих параметров взаимодействующих систем, отвечающих за различное число положительных показателей Ляпунова, реализуемых в этих системах в отсутствие связи между ними. В частности, показано, что режим обобщенной синхронизации возникает позже всего в том случае, когда ведущая система с меньшим числом положительных показателей Ляпунова воздействует на ведомую

систему с большим количеством этих показателей. Метод применен к тем же системам с запаздыванием, но связанным взаимно. Выявлены схожие изменения в спектре показателей Ляпунова в данном случае. Отдельно рассмотрен вопрос о зависимости порога установления обобщенной синхронизации от времени запаздывания. Обнаружена универсальная закономерность зависимости порогового значения установления синхронного режима от времени запаздывания для обоих типов связи.

Третья глава, как отмечалось выше, направлена на изучение фазовой и перемежающейся фазовой синхронизации в модельных и реальных нейрофизиологических системах. В этой главе предложен метод оценки степени синхронизма этих режимов, учитывающий специфику анализируемых сигналов и основанный на оценке величины нулевого условного показателя Ляпунова по временному ряду. Проведена апробация этого метода на модельных дискретных системах, допускающих расчет показателей Ляпунова при помощи классических методов и алгоритмов, получено хорошее соответствие результатов обоих методов. Метод применен к реальным нейрофизиологическим сигналам – записям электрической активности головного мозга человека и лабораторных животных, страдающих эпилепсией. Выявлены закономерности, присущие данным системам. В частности, обнаружена более высокая степень синхронизма приступов эпилепсии по сравнению с участками фоновой активности головного мозга человека. Кроме того, для лабораторных животных показано, что пик-волновые разряды лучше синхронизированы под действием лекарства.

Основные результаты работы и выводы компактно сформулированы в **заключении**. Анализируя их, можно выделить следующие наиболее интересные моменты:

- разработан и апробирован метод для расчета спектра показателей Ляпунова в системах с запаздыванием;
- при помощи разработанного метода проведено исследование закономерностей установления обобщенной синхронизации в односторонне и взаимно связанных системах с запаздыванием, выявлена характерная зависимость порогового значения параметра связи, соответствующего установлению режима обобщенной синхронизации, от величины времени запаздывания в виде увеличения его значения с последующим насыщением;
- предложена модификация метода оценки степени синхронизма режима перемежающейся фазовой синхронизации по временному ряду, основанная на вычислении условного нулевого показателя Ляпунова, при помощи которой выявлен ряд интересных закономерностей в нейрофизиологических системах по данным электроэнцефалограмм человека и лабораторных животных.

Достоверность результатов и выводов диссертационной работы основывается на использовании апробированных численных методов решения обыкновенных дифференциальных уравнений и дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом, соответствии результатов, полученных при помощи различных методов и подходов, а также отсутствием противоречий с известными в литературе данными.

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. Во второй главе диссертационной работы представлены результаты исследования особенностей обобщенной синхронизации в системах с запаздыванием с однонаправленным и взаимным типами связи. При этом, в качестве примеров однонаправленно связанных систем рассмотрены пара радиофизических генераторов с запаздыванием и два уравнения Маккея-Гласса, в то время как для систем с взаимным типом связи описаны результаты только для второй модели. Картина была бы более полной, если бы в работе был рассмотрен еще один пример систем с взаимным типом связи.
2. Также во второй главе при изучении режима обобщенной синхронизации в случае систем с взаимным типом связи было бы интересно рассмотреть ситуации с различными комбинациями управляющих параметров.
3. Третья глава диссертационной работы содержит достаточно большой теоретический раздел, иллюстрирующий основные характеристики перемежающейся фазовой синхронизации на примере двух однонаправленно связанных систем Ресслера. Далее автор переходит к описанию разработанного им метода оценки нулевого условного показателя Ляпунова по временному ряду и проводит его апробацию, но только путем рассмотрения квадратичного отображения, а потом переходит сразу к рассмотрению реальных сигналов. На наш взгляд, применение разработанного подхода к тем же однонаправленно связанным системам Ресслера органично вписалось бы в текст этой главы диссертации и позволило бы ликвидировать некий дисбаланс между первой и второй частью третьей главы.
4. В качестве небольшого замечания можно отметить неполное единство стиля в оформлении рисунков. Также было бы более наглядно, если бы на спектрах показателей Ляпунова был бы выделен момент наступления режима обобщенной синхронизации.

В тоже время, отмеченные недостатки не снижают общей оценки диссертационной работы А.Д. Плотниковой, которая выполнена на высоком уровне.

Заключение.

Диссертационная работа А.Д. Плотниковой является законченным научным исследованием, выполненным на актуальную для радиофизики тему. Диссертация соответствует специальности 1.3.4. – радиофизика.

По результатам диссертационной работы опубликовано 7 статей в центральных рецензируемых отечественных и зарубежных научных журналах, индексируемых международными базами данных (Web of Science, Scopus) и RSCI, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук: «Chaos, solitons & Fractals» (WOS, Scopus, Q1), «Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика» (WOS, Scopus), «Письма в Журнал Технической Физики» (WOS, Scopus) (3 статьи), «Известия РАН. Серия физическая» и др. Работа прошла хорошую апробацию на всероссийских и международных научных конференциях. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

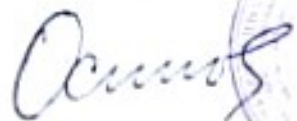
Результаты диссертационной работы могут быть использованы в научных исследованиях в Институте прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород), Институте радиотехники и электроники РАН (г. Москва), Физическом институте имени П.Н. Лебедева РАН (г. Москва), Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, Национальном исследовательском Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского, Воронежском государственном университете, Казанском (Приволжском) федеральном университете, Южном федеральном университете, Санкт-Петербургском государственном университете, Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Национальном исследовательском Томском государственном университете, Поволжском государственном университете телекоммуникаций и информатики, Иркутском государственном университете, а также могут быть рекомендованы к внедрению в учебный процесс в высших учебных заведениях Российской Федерации, ведущих подготовку специалистов (бакалавров, магистров, аспирантов) в области радиофизики.

С учетом вышесказанного можно полагать, что диссертационная работа Анастасии Дмитриевны Плотниковой вносит значительный вклад в развитие теории и приложений хаотической синхронизации как одного из разделов современной радиофизики и удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а сама Анастасия Дмитриевна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – радиофизика.

Отзыв составил

Осипов Григорий Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой теории управления и динамики систем института информационных технологий, математики и механики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, почтовый адрес: 603950, г. Нижний Новгород, проспект Гагарина, 23, телефон: +7(831) 462-33-57, e-mail: grigori.osipov@itmm.unn.ru

Подпись:



Отзыв составлен и утвержден на заседании кафедры теории управления и динамики систем института информационных технологий, математики и механики ННГУ им. Н.И. Лобачевского (протокол № 1 от 30 августа 2022 года).