

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Евстифеева Евгения Валентиновича

**«Исследование особенностей перемежающегося поведения на границе
обобщенной синхронизации в однонаправленно и взаимно связанных
хаотических системах с различной топологией аттрактора»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических
наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика**

Изучение сложной динамики и синхронного поведения связанных нелинейных динамических систем, демонстрирующих хаотическую динамику, является важной фундаментальной задачей радиофизики. В настоящее время различают несколько типов хаотической синхронизации. Это, прежде всего, режимы полной синхронизации, синхронизации с запаздыванием, обобщенной синхронизации и фазовой синхронизации. Важно отметить, что переход от одного типа синхронного поведения к другому может происходить в одной и той же динамической системе при изменении величины только одного управляющего параметра – параметра связи между системами, причем все вышеназванные типы синхронизации могут наблюдаться в хаотических системах и при однонаправленной, и при взаимной связи между ними. Наряду с большой фундаментальной важностью изучения данной проблемы различные типы хаотической синхронизации могут найти и практическое применение, например, в задачах передачи информации, в том числе скрытой, при моделировании и изучении динамики отдельных нейронов и нейронных сетей, машинном обучении, а также для разработки медицинского оборудования. Вышесказанное свидетельствует об актуальности и перспективности этого направления научных исследований не только для радиофизики, но и других междисциплинарных наук.

Одним из типов хаотической синхронизации, изучению которого посвящена диссертационная работа Евстифеева Евгения Валентиновича, является режим обобщенной синхронизации, показывающий наличие функциональной связи между состояниями взаимодействующих систем. В данной работе особое внимание уделено эффектам, имеющим место вблизи границы установления этого синхронного режима – режиму перемежающейся обобщенной синхронизации. При этом, в качестве объектов исследования выбраны системы с различной (простой и сложной) топологией аттрактора. Под системами с простой топологией аттрактора автор понимает системы с аттракторами ленточного типа, как, например, у системы Ресслера, а под системами со сложной топологией – осцилляторы с двулистной структурой аттрактора, примерами которых могут служить осцилляторы Лоренца или генераторы Чуа. В диссертационной работе разработаны новые универсальные методы анализа перемежаемости вблизи границы обобщенной синхронизации, справедливые для систем с различной топологией аттрактора и в случае однонаправленной, и в случае взаимной связи между ними, проведена их апробация путем сопоставления с результатами классических методов и подходов для случая однонаправленной связи, где такое сопоставление оказывается допустимым, и при помощи этих методов выявлены новые закономерности в системах с различными типами связи между системами, обнаружение которых ранее не представлялось возможным. Диссертационная работа характеризуется органичным сочетанием

фундаментальных аспектов изучаемого явления и их возможных приложений и полностью соответствует специальности 1.3.4. – Радиофизика.

Диссертационная работа (общий объем 142 стр., включая 45 иллюстраций и 7 таблиц) состоит из введения, трех глав и заключения. Список литературы содержит 119 источников. Диссертация имеет логично организованную структуру, характеризуется последовательным изложением результатов и качественным графическим оформлением.

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

Оригинальный материал диссертационного исследования представлен в трех главах. В начале каждой главы, до основных ее разделов, кратко изложено ее содержание, а затем последовательно приведены известные обзорные теоретические сведения по каждому изучаемому вопросу и оригинальные результаты, полученные диссертантом.

В **первой главе** рассмотрен сам режим обобщенной синхронизации и методы его диагностики в системах с однонаправленным и взаимным типами связи. Особое внимание уделено методу вспомогательной системы и результатам его применения для определения характеристик перемежающейся обобщенной синхронизации в однонаправленно связанных системах с различной топологией аттрактора. На примере систем Ресслера и осцилляторов Лоренца путем расчета статистических характеристик перемежаемости показано, что в таких системах на границе обобщенной синхронизации реализуются различные типы перемежаемости: перемежаемость типа on-off в системах с простой топологией и перемежаемость типа jump – в системах со сложной топологией, что находится в хорошем соответствии с известными ранее теоретическими результатами. В конце главы описывается метод более точной оценки статистических характеристик перемежаемости, основанный на комбинации метода вспомогательной системы и непрерывного вейвлетного преобразования, и приводятся результаты его работы.

Вторая глава является продолжением первой главы диссертации. В ней предложен новый универсальный метод определения характеристик перемежающейся обобщенной синхронизации, основанный на расчете локальных показателей Ляпунова. С целью проверки его работоспособности, метод применен к тем же системам с однонаправленной связью с теми же значениями управляющих параметров, что и в первой главе, полученные результаты сопоставлены с результатами метода вспомогательной системы, получено хорошее соответствие между ними. Далее разработанный метод применен для определения характеристик перемежающейся обобщенной синхронизации в системах с взаимным типом связи, в роли которых выступали те же системы с простой (системы Ресслера) и сложной (системы Лоренца) топологией аттрактора с теми же значениями управляющих параметров, но связанные взаимно. Впервые показано, что на границе обобщенной синхронизации во взаимно связанных системах с простой топологией аттрактора также имеет место перемежаемость типа on-off. В системах со сложной топологией аттрактора с взаимным типом связи реализуется перемежаемость типа jump, что находится в хорошем соответствии с недавно полученными результатами для систем со сложной топологией аттрактора при помощи метода перескоков. Вышесказанное

свидетельствует о независимости типа перемежаемости, реализуемого вблизи границы обобщенной синхронизации, от типа связи между системами. В конце главы рассмотрен вопрос о влиянии шума на определение характеристик перемежающейся обобщенной синхронизации при помощи разработанного подхода. Показано, что несмотря на количественные изменения в рассчитанных характеристиках, шум не оказывает существенного влияния на тип перемежаемости, реализуемый в данном случае. Полученные результаты существенным образом расширяют существующие теоретические представления о закономерностях перемежаемости вблизи границы обобщенной синхронизации в системах с различной топологией аттрактора и могут найти практическое применение при обработке экспериментальных временных рядов динамических систем различной природы.

Третья глава посвящена исследованию возможности существования мультистабильности в режиме перемежающейся обобщенной синхронизации в системах с различной топологией аттрактора. Наряду с потоковыми системами с различной топологией аттрактора, рассмотренными в предыдущих главах, в качестве объектов исследования в этой главе выбраны также системы с дискретным временем – однонаправленно связанные логистические отображения. На примере всех систем путем построения бассейнов притяжения синхронных и асинхронных состояний в различные моменты времени, полученных как при помощи модификации метода вспомогательной системы, так и расчета локальных показателей Ляпунова, показано наличие мультистабильности в данных случаях. В качестве количественной характеристики мультистабильности введена в рассмотрение мера мультистабильности как вероятность появления асинхронного режима. Для этого также использованы методы вспомогательной системы (в случае однонаправленной связи) и расчета локальных показателей Ляпунова. Показано, что по зависимости меры мультистабильности от времени можно определить статистические характеристики перемежаемости в системах с однонаправленным типом связи, причем точность данного метода оказывается выше по сравнению с методом вспомогательной системы, а по зависимости усредненной во времени меры мультистабильности – более точное значение порога обобщенной синхронизации. Важно отметить, что для однонаправленно связанных систем меры мультистабильности, рассчитанные при помощи метода вспомогательной системы и расчета локальных показателей Ляпунова, оказались примерно одинаковыми, что свидетельствует об универсальности как явления мультистабильности в контексте перемежающейся обобщенной синхронизации, так и методов и подходов к анализу данного типа поведения с учетом мультистабильности. Вышесказанное может быть полезным в информационно-телекоммуникационных системах, например, при проектировании скрытых систем связи.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

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

1. Предложенный метод анализа перемежающегося поведения вблизи границы обобщенной синхронизации в системах с различной топологией аттрактора, основанный на расчете локальных показателей Ляпунова. Как отмечалось выше, этот метод может найти широкое применение на практике при обработке сигналов различной природы.

2. Независимость типа перемежаемости от типа связи между системами.

3. Мультистабильность в режиме перемежающейся обобщенной синхронизации и перспективы ее использования в информационно-телекоммуникационных 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, входящих в Белый список и 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: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science», «Письма в журнал технической физики», «Известия РАН. Серия физическая», «Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика», что подтверждает высокий уровень научных результатов, полученных соискателем.

Достоверность полученных результатов и выводов диссертационной работы Евстифеева Е.В. обеспечивается применением известных, хорошо изученных моделей и подходов, использованием строгих математических методов и процедур, воспроизводимостью результатов и согласованностью данных, полученных при помощи различных методов и подходов, отсутствием противоречий с известными научными результатами, полученными в данной области.

По диссертации имеется ряд вопросов и замечаний:

1. В третьей главе диссертационной работы (раздел 3.3) описан метод определения статистических характеристик перемежаемости с учетом мультистабильности, при этом расчет меры мультистабильности осуществлялся на основе модификации метода вспомогательной системы. Было бы интересно сопоставить результаты работоспособности данного подхода с аналогичным методом, когда мера мультистабильности рассчитывается с использованием метода оценки локальных показателей Ляпунова. Подобный подход позволил бы определить статистические характеристики перемежаемости с учетом мультистабильности в системах с взаимным типом связи.

2. В той же третьей главе диссертационной работы, как отмечалось выше, наряду с потоковыми системами с различной топологией аттрактора рассматриваются системы с дискретным временем – логистические отображения. При этом, для потоковых систем достаточно большое внимание уделяется рассмотрению и однонаправленного, и взаимного типов связи, однако, для дискретных отображений автор ограничивается рассмотрением только случая однонаправленной связи. Было бы интересным рассмотреть также проявление мультистабильности вблизи границы обобщенной синхронизации во взаимно связанных логистических отображениях.

3. Объектами исследования в диссертационной работе являются взаимодействующие системы с одинаковой топологией аттрактора (однонаправленно и взаимно связанные системы или с простой, или со сложной топологией аттрактора). Возникает вопрос о возможности возникновения обобщенной синхронизации и перемежающегося поведения вблизи его границы в случае взаимодействия систем с различной топологией аттрактора, например, когда система с простой топологией аттрактора воздействует на систему со сложной топологией или наоборот.

Указанные замечания не снижают общего положительного впечатления от диссертационной работы. Диссертация Евстифеева Е.В. 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 10 статей в центральных рецензируемых отечественных и зарубежных научных журналах, входящих в Белый список и международные базы данных Web of Science и/или Scopus, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, а также 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 13 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 Евстифеева Евгения Валентиновича вносит важный вклад в область радиофизики, связанную с изучением обобщенной синхронизации в хаотических системах с различной топологией аттрактора. 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 (с изменениями и дополнениями), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Евстифеев Евгений Валентинович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика.

Официальный оппонент

Ведущий научный сотрудник отдела нелинейной динамики Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», г. Нижний Новгород, доктор физико-математических наук (специальность 1.3.4. — Радиофизика), доцент

Клиньшов Владимир Викторович

«3» декабря 2025 г.

Почтовый адрес: 603950, г. Нижний Новгород. БОКС - 120, ул. Ульянова, 46, телефон: +7(910)795-65-76, e-mail: vladimir.klinshov@gmail.com

Подпись Клиньшова В.В. заверена

Ученый секретарь ИИФ РАН
к.ф.-м.н.



Корюкин Игорь Валерьевич