

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Ханадеева Владислава Андреевича

«Исследование особенностей обобщенной синхронизации в системах со сложной топологией аттрактора»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика

Динамика связанных нелинейных динамических систем, демонстрирующих хаотическое поведение, очень интересна и разнообразна. Она сильно зависит от управляющих параметров взаимодействующих систем и, в первую очередь, от величины параметра связи между этими системами. Связь между системами может быть однонаправленной и взаимной, что также оказывает сильное влияние на поведение систем. В то же самое время, независимо от типа связи между этими системами при изменении параметра связи в них наблюдается переход от одного типа хаотической синхронизации к другому, в связи с чем различают режимы полной синхронизации, синхронизации с запаздыванием, обобщенной синхронизации и фазовой синхронизации. Каждый из вышеназванных типов синхронного поведения по-своему интересен и важен, что обусловлено, прежде всего, фундаментальной важностью изучения данной проблемы. В то же самое время, различные типы хаотической синхронизации могут найти практическое применение, например, в задачах скрытой передачи информации, при диагностике динамики некоторых биологических систем, при управлении хаосом в СВЧ генераторах и пр. Вышесказанное свидетельствует об актуальности и перспективности этого направления научных исследований не только для радиофизики, но и других междисциплинарных наук.

Диссертационная работа Ханадеева Владислава Андреевича посвящена рассмотрению одного из вышеупомянутых типов хаотической синхронизации – режима обобщенной синхронизации. При этом, в качестве объектов исследования выбраны сложные модельные системы, названные автором системами со сложной топологией аттрактора. Это системы, имеющие двулистную структуру аттрактора, классическими примерами которых являются осцилляторы Лоренца, системы Чена, представляющие собой четырехмерную модификацию систем Лоренца, генераторы Чуа и др. В работе рассмотрены как особенности установления режима обобщенной синхронизации в системах с такой топологией, связанных однонаправленно и взаимно, по сравнению со случаем систем с аттрактором ленточного типа, так и новые эффекты вблизи границы этого режима, обусловленные структурой аттрактора. Особое внимание в рамках диссертационной работы уделено разработке

и апробации новых методов и подходов к анализу обобщенной синхронизации и перемежающегося поведения, имеющего место вблизи границы этого режима, характерных для систем со сложной топологией аттрактора. Диссертационная работа характеризуется органичным сочетанием фундаментальных аспектов изучаемого явления и их возможных приложений и полностью соответствует специальности 1.3.4. – Радиофизика.

Диссертация (общий объем 100 стр., включая 25 иллюстраций и 1 таблицу) состоит из введения, трех глав и заключения. Список литературы содержит 122 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 четыре положения, выносимых на защиту, приведены сведения об апробации результатов и публикациях.

Оригинальный материал диссертационного исследования изложен в трех главах. Логика каждой главы является примерно одинаковой: в начале главы дается краткий обзор известных результатов по изучаемому вопросу, а затем излагаются оригинальные результаты, полученные диссертантом.

В **первой главе** рассмотрены методы диагностики режима обобщенной синхронизации в системах со сложной топологией аттрактора: метод вспомогательной системы, метод расчета спектра показателей Ляпунова, метод ближайших соседей и адаптированный в рамках диссертационной работы на системы со сложной топологией аттрактора метод фазовых трубок. На примере однонаправленно связанных систем Лоренца и взаимно связанных систем Чена установлено, что метод ближайших соседей не позволяет корректно детектировать наличие обобщенной синхронизации в системах с такой топологией, метод вспомогательной системы работает корректно только при однонаправленной связи между системами, а метод расчета спектра показателей Ляпунова и метод фазовых трубок оказываются эффективными как в случае однонаправленной, так и взаимной связи между системами. На основе полученных результатов сделан вывод о возможности использования метода фазовых трубок для решения прикладных задач в различных областях науки и техники, включая информационно-телекоммуникационные системы и нейрофизиологические задачи, в основе которых лежит анализ и обработка больших объемов данных.

Вторая глава является продолжением первой главы диссертации. В ней рассмотрена перемежаемость на границе обобщенной синхронизации в системах со сложной топологией аттрактора, а в качестве объектов исследования выбраны те же системы Лоренца и генераторы Чена, что и в первой главе, но для осцилляторов Лоренца рассмотрены случаи и однонаправленной, и взаимной связи. Для выделения характерных (синхронных и асинхронных) фаз поведения в однонаправленно связанных системах использовался метод вспомогательной системы, при помощи которого показано, что статистические характеристики перемежаемости в данном случае существенным образом отличаются от известных закономерностей, характерных для перемежаемости типа on-off в однонаправленно связанных системах с простой топологией аттрактора. Выявлен механизм возникновения перемежаемости в данном случае. Показано, что он обусловлен топологией аттрактора и связан с перескоком изображающих точек на разные листы аттракторов взаимодействующих систем, что позволило получить аналитические закономерности для распределений длительностей характерных фаз поведения систем, а также предложить метод, основанный на анализе расположения изображающих точек на аттракторах взаимодействующих систем, и сравнить полученные при помощи него результаты с результатами метода вспомогательной системы. Установлено, что предложенный метод по степени точности не сильно уступает методу вспомогательной системы для случая однонаправленной связи, а в системах с взаимным типом связи является практически единственным подходом, позволяющим определить характеристики перемежаемости, имеющей место вблизи границы обобщенной синхронизации в данном случае. Впервые показано, что характеристики перемежаемости на границе обобщенной синхронизации в системах со сложной топологией аттрактора не зависят от типа связи между системами и подчиняются экспоненциальным законам. Полученные результаты существенно образом расширяют существующие теоретические представления о механизмах возникновения перемежаемости вблизи границы обобщенной синхронизации в таких системах и могут найти практическое применение при обработке экспериментальных временных рядов динамических систем, топология аттрактора которых является достаточно сложной.

Третья глава посвящена изучению влияния шума на обобщенную синхронизацию в однонаправленно и взаимно связанных системах со сложной топологией аттрактора. Этот вопрос исследовался ранее в работах предшественников, но применительно к системам с относительно простой топологией аттрактора и связанным только однонаправленно друг с другом. В этой главе даны теоретические предпосылки изучения влияния шума на обобщенную синхронизацию и приведены результаты оригинальных исследований обобщенной

синхронизации в системах Лоренца и Чена, связанных однонаправленно и взаимно. Изучен вопрос о влиянии характеристик шумового сигнала на установление обобщенной синхронизации в таких системах. На основании проведенных исследований сделан вывод об устойчивости режима обобщенной синхронизации по отношению к шумам в системах со сложной топологией аттрактора в случае обоих типов связи между системами, независимости диапазона устойчивости от характеристик шумового сигнала и сильном влиянии типа связи между системами на этот диапазон. Обнаруженные особенности объяснены слабым влиянием шума на структуру аттракторов взаимодействующих систем в случае и однонаправленной, и взаимной связи, и опосредованным воздействием шума на обе системы при взаимном влиянии систем друг на друга. Выявленные закономерности могут найти применение в информационно-телекоммуникационных системах для повышения конфиденциальности способов скрытой передачи информации, основанных на явлении обобщенной синхронизации в присутствии шума.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

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

1. Предложенные и адаптированные методы анализа обобщенной синхронизации и перемежающегося поведения вблизи ее границы в системах со сложной топологией аттрактора. Как отмечалось выше, эти методы могут найти широкое применение на практике при обработке сигналов различной природы.

2. Новый тип перемежаемости, имеющий место вблизи границы обобщенной синхронизации в однонаправленно и взаимно связанных системах со сложной топологией аттрактора.

3. Обнаруженная возможность использования обобщенной синхронизации в присутствии шума 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, 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 «Physical Review E», «Письма в журнал технической физики», «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 Ханадеева В.А. обеспечивается применением хорошо известных и общепринятых

моделей, использованием строгих математических методов и подходов, отсутствием противоречий с известными научными результатами, полученными в данной области, воспроизводимостью результатов и согласованностью данных, полученных при помощи различных методов и подходов.

По диссертации имеется ряд вопросов и замечаний:

1. При описании результатов первой главы автор уделяет большое внимание эффективности метода фазовых трубок для диагностики обобщенной синхронизации в системах со сложной топологией аттрактора при фиксированных значениях управляющих параметров, когда метод ближайших соседей оказывается неработоспособным. В то же самое время, вопрос о работоспособности этих подходов при изменении параметра связи в работе не обсуждается. Можно было бы ввести в рассмотрение какую-нибудь количественную характеристику, характеризующую эффективность вышеназванных методов, и рассмотреть вопрос о ее изменении с ростом силы связи между системами. Возможно ли по ней диагностировать порог возникновения обобщенной синхронизации в системах со сложной топологией аттрактора?

2. В качестве объектов исследования в диссертационной работе рассматриваются однонаправленно и взаимно связанные осцилляторы Лоренца и системы Чена, обладающие двулистной структурой аттрактора. При этом, во введении диссертант упоминает о том, что подобной структурой обладают и генераторы Чуа, однако, эти системы в диссертации не рассматриваются. Возникает вопрос, сохранятся ли закономерности, обнаруженные в диссертационной работе, для этой системы? Также было бы интересно пронаблюдать обнаруженные закономерности, например, новый тип перемежаемости в радиотехническом эксперименте с генераторами Чуа.

3. Все системы, рассмотренные в диссертационной работе, обладают аттракторами с симметричной структурой. Сохранятся ли обнаруженные закономерности для систем с несимметричными аттракторами?

Указанные замечания не снижают общего положительного впечатления от диссертационной работы. Диссертация Ханадеева В.А. 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/или Scopus, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, а также получено 2 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 Ханадеева Владислава Андреевича вносит важный вклад в область радиофизики, связанную с изучением обобщенной синхронизации в сложных нелинейных динамических системах, демонстрирующих хаотическую динамику. 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 Ханадеев Владислав Андреевич заслуживает присуждения ему 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

«13» апреля 2023 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

Заверена ч.о. начальница ОК
Соловьева О.В. Соколов

