

ОТЗЫВ

официального оппонента 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»

Одним из актуальных направлений современной радиофизики является изучение сложной динамики и синхронного поведения нелинейных систем, способных демонстрировать хаотическое поведение. Интерес к данному явлению обусловлен как фундаментальными, так и прикладными аспектами его изучения. В частности, хорошо известно, что различные типы синхронизации хаотических динамических систем могут найти применение, например, в информационно-телекоммуникационных системах, при обработке сигналов биологической и нейрофизиологической природы, при управлении хаосом в микроволновых системах. Вышесказанное невозможно без эффективных методов и подходов к анализу различных типов синхронизации, одним из которых является расчет спектра показателей Ляпунова.

В настоящее время известно несколько широко распространенных и эффективно используемых методов расчета спектра показателей Ляпунова в случае известного и неизвестного оператора эволюции системы. В частности, для систем с малым числом степеней свободы для нахождения полного спектра показателей Ляпунова активно используется численный метод, основанный на применении алгоритма Бенеттина, включающий процедуру периодической ортогонализации и нормировки возмущений. Для пространственно-распределенных систем предложено несколько модификаций данного алгоритма, основанных на использовании понятия «состояния системы», выбор которого зависит от оператора эволюции пространственно-распределенной системы и определяется набором динамических переменных, зависящих как только от времени, так и от времени и пространственной координаты. В случае неизвестного оператора эволюции возможен расчет спектра показателей Ляпунова по временным рядам, однако, известные методы и алгоритмы, такие как, например, методы Вольфа, Экмана и Розенштейна, не позволяют рассчитать полный спектр показателей Ляпунова, при этом точность расчета каждого последующего показателя Ляпунова оказывается значительно меньше предыдущего. Вышесказанное свидетельствует об отсутствии универсальных методов расчета спектра показателей Ляпунова для широкого класса динамических систем, что требует их дальнейшего совершенствования и модификации.

Диссертационная работа Плотниковой Анастасии Дмитриевны как раз и посвящена изучению данной проблемы. Эта работа направлена на решение

актуальной задачи радиофизики, связанной с изучением сложной динамики и синхронного поведения хаотических динамических систем с использованием расчета спектра показателей Ляпунова. Основными объектами исследования в диссертации выбраны системы с запаздыванием и реальные экспериментальные временные ряды, процедура расчета спектра показателей Ляпунова для которых является весьма нетривиальной.

Диссертационная работа состоит из Введения, трех глав и заключения. Она имеет логичную структуру, подчиняющуюся принципу «от простого к сложному», и характеризуется сбалансированным сочетанием фундаментальных аспектов изучаемой проблемы и ее возможных приложений. Диссертация полностью соответствует специальности 1.3.4 – радиофизика и, как отмечалось выше, является актуальной, современной и практически значимой.

Основное содержание диссертации изложено на 104 страницах машинописного текста, включая 29 иллюстраций и 2 таблицы. Список литературы содержит 162 источника.

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, поставлены цель и задачи диссертации, определены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлена информация о достоверности и апробации результатов и сформулированы основные положения и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе предложен метод расчета спектра показателей Ляпунова для систем с запаздыванием, основанный на рассмотрении эволюции во времени пространственного состояния системы и (с периодическими ортогонализациями и перенормировками) его возмущений. Апробация метода проведена на одномерных системах, для которых в качестве состояния выступала скалярная переменная, определенная на интервале времени с длительностью, равной времени запаздывания. В качестве примеров таких систем рассмотрены радиофизический генератор с запаздыванием и модель кроветворения Маккея-Гласса. Для обеих систем построены зависимости девяти старших показателей Ляпунова от одного из управляющих параметров, полученные результаты сопоставлены с бифуркационными диаграммами, установлено хорошее соответствие между ними.

Во второй главе предложенный метод применен для исследования одного из типов синхронизации хаотических динамических систем – обобщенной хаотической синхронизации в системах с запаздыванием, связанных однонаправленно и взаимно. Выбор именно этого типа синхронного поведения для исследования обусловлен тем, что диагностика обобщенной синхронизации в связанных системах может осуществляться при помощи расчета спектра показателей Ляпунова и, если для однонаправленно связанных систем этот метод является одним из возможных методов диагностики синхронного режима, то для систем с взаимным типом связи указанный метод оказывается практически единственным методом детектирования этого режима. Апробация метода применительно к связанным системам осуществлялась на тех же генераторах с запаздыванием и уравнениях Маккея-

Гласса, но связанных однонаправленно друг с другом. Результаты расчета спектра показателей Ляпунова в зависимости от параметра связи между системами были сопоставлены с результатами метода вспомогательной системы. Рассматривались различные случаи взаимодействия систем, отличающиеся друг от друга различным числом показателей Ляпунова в этих системах в отсутствие связи между ними. Показано, что управляющие параметры взаимодействующих систем оказывают сильное влияние на порог возникновения режима обобщенной синхронизации. Наибольшее значение силы связи требуется в случае, когда ведущая система с меньшим числом положительных показателей Ляпунова воздействует на ведомую систему с большим количеством этих показателей. При этом, оба метода диагностики синхронного режима (метод вспомогательной системы и метод расчета показателей Ляпунова) приводят к одинаковым результатам. Предложенный метод применен к системам с взаимным типом связи. Выявлены схожие закономерности установления синхронного режима в данном случае.

Особое внимание в рамках второй главы диссертационной работы уделено вопросу о зависимости порога установления обобщенной синхронизации от времени запаздывания как в однонаправленно, так и взаимно связанных системах. Показано, что для обоих типов связи при увеличении времени запаздывания порог обобщенной синхронизации сначала монотонно возрастает, а затем выходит на уровень насыщения, величина которого зависит от значений управляющих параметров взаимодействующих систем. Подобная закономерность, по всей видимости, является универсальной, так как схожее поведение было обнаружено ранее для режима полной синхронизации однонаправленно связанных идентичных систем с запаздыванием, который, как известно, является частным проявлением режима обобщенной синхронизации в системах с однонаправленным и взаимным типами связи.

В рамках третьей главы предложен новый метод для оценки степени синхронизма перемежающейся фазовой синхронизации на основе расчета условного нулевого показателя Ляпунова взаимодействующих систем по временному ряду. Апробация метода проведена на модельном квадратичном отображении. Метод применен к сигналам электроэнцефалограмм человека и лабораторных животных, страдающих эпилепсией. Обнаружен ряд особенностей, присущих этим сигналам. В частности, обнаружено, что пик-волновые разряды обладают большей степенью синхронизма по сравнению с участками фоновой активности головного мозга человека, в то время как для лабораторных крыс пик-волновые разряды оказываются лучше синхронизированными под действием лекарства.

Работа написана четким и понятным научным языком и оставляет приятное впечатление. Достоверность и обоснованность научных результатов и положений, выносимых на защиту, обеспечиваются выбором адекватных классических математических моделей и базовых методов для их изучения, отличным соответствием результатов, полученных при помощи различных методов и

подходов, а также отсутствием расхождений с существующими опубликованными и общепризнанными научными результатами.

Результаты диссертационной работы отличаются несомненной новизной, а также научной и практической значимостью, подтверждением чего является достаточно большое число научных работ, опубликованных соискателем. По материалам диссертации опубликовано 20 научных работ, среди которых 7 статей в центральных рецензируемых отечественных и зарубежных научных журналах, индексируемых международными базами данных Web of Science и Scopus, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных научных результатов кандидатских и докторских диссертаций. Среди статей, опубликованных соискателем, присутствует статья в журнале *Chaos, Solitons & Fractals*, одном из наиболее престижных журналов по нелинейной динамике, входящем в первый квартиль, импакт-фактор которого в настоящее время составляет 9.922. Все отечественные журналы («Письма в ЖТФ», «Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика», «Известия РАН. Серия физическая»), в которых опубликованы работы диссертанта, также индексируются международными базами данных.

Основные положения, вынесенные соискателем на защиту, не вызывают существенных нареканий. По самому содержанию диссертации можно сформулировать следующие замечания:

1. Форма записи уравнений и значения управляющих параметров, используемых для однонаправленно и взаимно связанных уравнений Маккея-Гласса в рамках второй главы диссертационной работы, существенно отличаются от формы записи и параметров, приведенных в первой главе. Автор обосновывает такое изменение тем, что при выбранных значениях управляющих параметров взаимодействующие системы характеризуются большим числом положительных показателей Ляпунова. На мой взгляд, этому вопросу можно было бы уделить большее внимание или хотя бы использовать одну и ту же форму записи и обозначения параметров в рамках первой и второй главы.
2. В рамках второй главы диссертационной работы автор уделяет достаточно большое внимание вопросу о наличии перемежающегося поведения вблизи границы обобщенной синхронизации в однонаправленно связанных генераторах с запаздыванием и уравнениях Маккея-Гласса. Однако, наличие перемежаемости иллюстрируется лишь качественно путем построения плоскостей состояний ведомой и вспомогательной систем. Было бы интересно также рассчитать статистические характеристики перемежаемости и определить ее тип.
3. При оценке нулевого условного показателя Ляпунова в модельных системах и по реальным экспериментальным временным рядам автор не уделяет внимание вопросу о точности метода, и если для экспериментальных временных рядов такое вполне допустимо, то для модельной системы такой

расчет можно было бы легко произвести, тем более что все исходные данные для этого были уже получены. На мой взгляд, это послужило бы дополнительным подтверждением эффективности предложенного подхода.

Сделанные замечания не касаются основных идей и результатов автора, изложенных в диссертации, и не влияют на общую положительную оценку работы. Диссертация А.Д. Плотниковой представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, содержащую решение актуальной научной задачи, имеющей существенное значение для радиофизики, связанной с применением показателей Ляпунова для изучения динамики сложных связанных систем, демонстрирующих синхронное поведение. Основное содержание диссертации опубликовано в 20 научных работах автора, включая 7 статей в престижных отечественных и зарубежных научных журналах, результаты работы апробированы на 10 различных научных конференциях и семинарах.

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. Автореферат содержит всю необходимую информацию и адекватно отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа Плотниковой Анастасии Дмитриевны удовлетворяет всем требованиям пп. 9-11, 13, 14 действующего «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «1.3.4. – радиофизика».

Официальный оппонент

Профессор лаборатории нейронауки и когнитивных технологий Автономной некоммерческой организации высшего образования «Университет Иннополис», доктор физико-математических наук (05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ)

 Владимир Александрович Максименко

Почтовый адрес: 420500, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 1, телефон: +7(905)3248118, e-mail: maximenkov1@gmail.com

Согласен на обработку персональных данных.

«31» августа 2022 г.



 Максименко В.А. заверяю.
Директор по развитию и кадровой политике
АНО ВО «Университет Иннополис»

Р.Ф. Валиев