

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию 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

Одним из актуальных направлений современной радиофизики является исследование хаотической синхронизации в связанных динамических системах. Интерес к данному явлению обусловлен как фундаментальными, так и прикладными аспектами его изучения. В частности, в настоящее время известно, что различные типы хаотической синхронизации могут найти применение в информационно-телекоммуникационных системах, при обработке сигналов биологической и нейрофизиологической природы, при управлении хаосом в микроволновых системах и других задачах.

Среди известных в настоящее время типов хаотической синхронизации наибольший интерес представляет явление обобщенной синхронизации. О существовании этого режима известно достаточно давно, начиная с работ Николая Рулькова 1995 года, описавшего этот тип синхронного поведения в однонаправленно связанных радиотехнических генераторах, демонстрирующих хаотическую динамику. Позднее понятие обобщенной синхронизации было расширено на взаимно связанные системы и сети связанных нелинейных элементов. В последние годы учеными различных стран мира проводится активное изучение обобщенной синхронизации, но несмотря на наличие достаточно большого числа публикаций по данной тематике, еще много вопросов оказывается неизученным и требующим дальнейшего всестороннего исследования.

Одним из таких вопросов, которому как раз и посвящена диссертационная работа Евстифеева Евгения Валентиновича, является исследование перемежающегося поведения, имеющего место вблизи границы обобщенной синхронизации в однонаправленно и взаимно связанных системах с различной топологией аттрактора – так называемого режима перемежающейся обобщенной синхронизации. До недавнего времени было известно только о существовании перемежаемости типа on-off в случае однонаправленной связи между системами. Позднее было установлено, что этот тип поведения наблюдается только в ограниченном классе динамических систем – системах с аттракторами ленточного типа, а в системах с двулистной структурой аттрактора имеет место перемежаемость перескоков. Однако, известные в настоящее время методы анализа перемежаемости вблизи границы обобщенной синхронизации, имеют ограниченную область применения, что не позволяет провести всестороннее исследование перемежаемости вблизи границы этого режима. В диссертационной работе Евстифеева Е.В. предложены новые универсальные методы анализа перемежающейся обобщенной синхронизации, справедливые как в случае однонаправленной, так и взаимной связи

между взаимодействующими системами и независящие от типа аттракторов рассматриваемых систем. При помощи этих методов получены принципиально новые результаты в области исследования обобщенной синхронизации и эффектов вблизи ее границы.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения. Она имеет логичную структуру, подчиняющуюся принципу «от простого к сложному», и характеризуется органичным сочетанием результатов теоретического рассмотрения и численного моделирования. Диссертация полностью соответствует специальности 1.3.4. – Радиофизика и, как отмечалось выше, является актуальной и своевременной.

Основное содержание диссертации изложено на 142 страницах машинописного текста, включая 45 иллюстраций и 7 таблиц. Список литературы содержит 119 источников.

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

В первой главе приведены краткие теоретические сведения о режиме обобщенной синхронизации: дано определение этого режима в случае однонаправленной и взаимной связи между системами, рассмотрены различные методы его диагностики, их достоинства и недостатки в зависимости от типа связи. Далее обсужден вопрос о перемежаемости вблизи границы этого режима в случае однонаправленной связи. На примере систем с различной топологией аттрактора изучены характеристики перемежаемости в таких системах при помощи метода вспомогательной системы. Показано, что в системах с аттракторами ленточного типа наблюдается перемежаемость типа on-off, а в системах с двулистной топологией аттракторов – перемежаемость перескоков. В конце этой главы рассмотрен вопрос о возможности применения непрерывного вейвлетного преобразования для анализа характеристик перемежаемости. Показано, что применение такого подхода к сигналу, полученному при помощи метода вспомогательной системы, позволяет повысить точность оценки статистических характеристик перемежаемости, в том числе в присутствии шума.

Во второй главе предложен универсальный метод исследования перемежающейся обобщенной синхронизации с помощью локальных показателей Ляпунова. Апробация метода проведена на системах с различной топологией аттрактора с однонаправленным типом связи, рассмотренных в первой главе. Путем расчета статистических характеристик перемежаемости проведено сравнение точности предложенного метода с точностью метода вспомогательной системы. Показано, что несмотря на то, что точность предложенного подхода немного уступает классическому методу вспомогательной системы, он позволяет корректно определить статистические характеристики перемежаемости и определить ее тип.

При помощи разработанного метода впервые установлено, что вблизи границы обобщенной синхронизации в системах с различной топологией аттрактора с взаимным типом связи также наблюдается перемежающееся поведение, причем его тип не зависит от типа связи между системами, а определяется топологией аттракторов взаимодействующих систем. Иными словами, в однонаправленно и взаимно связанных системах с аттракторами ленточного типа наблюдается перемежаемость типа on-off, а в системах с двулистной структурой имеет место перемежаемость перескоков. Установлено, что перемежаемость перескоков оказывается устойчивой по отношению к шуму.

В третьей главе установлено, что в режиме перемежающейся обобщенной синхронизации наблюдается мультистабильность, и приведены доказательства существования данного режима в системах с непрерывным временем с различной топологией аттрактора и дискретных отображениях. Для этого для всех рассматриваемых систем получены бассейны притяжения синхронных и асинхронных состояний в различные моменты времени и введена в рассмотрение мера мультистабильности как вероятность возникновения асинхронного режима. Для этого по аналогии с предыдущими главами использовались метод вспомогательной системы (в случае однонаправленной связи) и разработанный метод оценки локальных показателей Ляпунова (для однонаправленной и взаимной связи). Показано, что для однонаправленной связи оба метода дают хорошо согласующиеся между собой результаты. Установлено, что введенная мера мультистабильности может использоваться для более точного определения характеристик перемежающейся обобщенной синхронизации в случае однонаправленной связи, если рассматривать ее зависимость от времени, а усредненная по времени зависимость этой меры от параметра связи может быть рассмотрена как метод диагностики обобщенной синхронизации в однонаправленно и взаимно связанных системах.

В заключении подведены итоги диссертационной работы, сформулированы основные результаты и выводы.

Работа написана четким и понятным научным языком и оставляет приятное впечатление. Достоверность и обоснованность научных результатов и выводов, приведенных в диссертации Евстифеева Е.В. и прошедших хорошую апробацию на представительных международных и всероссийских научных конференциях и семинарах, обеспечиваются выбором адекватных классических математических моделей и базовых методов для их изучения, согласованностью представленных теоретических выводов, качественных интерпретаций и результатов численного моделирования, качественным (а в ряде случаев и количественным) совпадением полученных результатов с отдельными результатами исследований, известными из литературы.

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 26 научных работ, включая 10 статей в высокорейтинговых научных журналах, входящих в Белый список и международные системы научного цитирования Web of Science/Scopus, рекомендованных ВАК России для опубликования основных научных результатов кандидатских и докторских диссертаций, 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 13 статей и тезисов докладов в сборниках трудов научных конференций. Среди статей, опубликованных соискателем, присутствуют две статьи в журнале *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, одном из наиболее престижных журналов по нелинейной динамике, входящем в первый квартиль. Большая часть отечественных журналов (Письма в ЖТФ, Известия РАН. Серия физическая, Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика), в которых опубликованы работы соискателя, также индексируются международными базами данных. Полученные в диссертации результаты могут быть востребованы в высокотехнологичных отраслях экономики, например, при разработке информационно-телекоммуникационных систем или при исследовании процессов синхронизации объектов различной природы. Автореферат содержит всю необходимую информацию и адекватно отражает содержание диссертации.

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

1. В первой и второй главах диссертационной работы рассматриваются характеристики перемежающейся обобщенной синхронизации (распределения длительностей ламинарных фаз, зависимость средних длительностей ламинарных фаз от параметра надкритичности), рассчитанные при помощи метода вспомогательной системы (первая глава) и предложенного метода расчета локальных показателей Ляпунова (вторая глава). При этом, сопоставление результатов обоих методов друг с другом осуществляется путем расчета относительных отклонений рассчитанных характеристик от известных теоретических закономерностей. Было бы наглядно, если бы характеристики, рассчитанные при помощи обоих методов, были представлены на одном графике.
2. При исследовании влияния шума на характеристики перемежаемости в первой главе шум добавляется непосредственно к сигналу, а во второй главе – в уравнения системы. Одинаковый способ добавления шума и рассмотрение одинаковых систем для исследования позволили бы сопоставить устойчивость рассматриваемых методов, основанных на непрерывном вейвлетном преобразовании (первая глава) и расчете локальных показателей Ляпунова (вторая глава), друг с другом.
3. Основной характеристикой для анализа во второй главе является зависимость второго локального показателя Ляпунова от времени. В то же самое время, на нескольких рисунках (рисунки 2.4, 2.8, 2.12) второй главы приведены также временные зависимости нулевого локального показателя Ляпунова. Так как

этот показатель является практически постоянным, приведение его на рисунках не является необходимым.

Сделанные замечания не касаются основных идей и результатов автора, изложенных в диссертации, и не влияют на общую положительную оценку работы. Диссертация Е.В. Евстифеева представляет собой выполненную на высоком уровне законченную научно-исследовательскую работу, содержащую решение актуальной научной задачи, имеющей существенное значение для радиофизики, связанной с исследованием особенностей перемежающейся обобщенной синхронизации в системах с различной топологией аттрактора. Считаю, что диссертационная работа Евстифеева Евгения Валентиновича 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 (с изменениями и дополнениями), предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика.

Официальный оппонент

кандидат физико-математических наук (01.04.03), ведущий научный сотрудник научно-исследовательского института прикладного искусственного интеллекта и цифровых решений федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова», г. Москва

Андреев Андрей Викторович

Почтовый адрес: 115054, г. Москва, Стремянный пер. 36, телефон: +7(987)360-92-32, e-mail: andreevandreil1993@gmail.com

«20» ноября 2025 г.

