

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертационную работу  
Москаленко Ольги Игоревны

«Хаотическая синхронизация и перемежающееся поведение в неавтономных и связанных системах с малым числом степеней свободы, пространственно-распределенных средах и сетях связанных нелинейных элементов»,  
представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика.

На заключение представлена диссертационная работа Москаленко Ольги Игоревны, изложенная на 435 страницах (включая 122 иллюстрации и 4 таблицы), состоящая из введения, пяти глав, заключения и списка используемой литературы из 445 наименований.

### **Актуальность работы**

Представленная на отзыв диссертационная работа посвящена систематическому изучению различных типов синхронизации хаотических режимов и перемежающегося поведения, которое возникает на границах режимов синхронного поведения, в неавтономных и связанных системах, как с малым числом степеней свободы, так и в пространственно-распределенных средах и сетях связанных нелинейных элементов. Данная проблематика активно исследуется в течение последних нескольких десятилетий, что находит свое подтверждение в постоянном увеличении количества выходящих статей в рецензируемых научных журналах с высоким импакт-фактором, проводимых международных и всероссийских конференциях, появлением монографий по данной тематике и т.п. Важно отметить также постоянное расширение спектра научных исследований по данному направлению, имеющих ярко выраженную практическую направленность, прежде всего в области радиофизики и изучения биологических и нейрофизиологических систем. Эти исследования ставят новые проблемы и с необходимостью диктуют потребность в дальнейших (все более сложных и емких по ресурсам) исследованиях в направлении изучения поведения связанных взаимодействующих систем и связанных с ним явлений и закономерностей.

Диссертационная работа Москаленко Ольги Игоревны является важным и существенным шагом в данном направлении. Проблемы, рассмотренные в диссертационной работе и полученные результаты систематично заполняют существующие пробелы в теории хаотической синхронизации и теории перемежающегося поведения. Можно с уверенностью утверждать, что диссертационная работа Ольги Игоревны Москаленко является важной и актуальной, а проведенные в диссертационной работе научные исследования представляют значительный интерес для весьма широкого круга исследователей, занимающихся изучением процессов взаимодействия сложных нелинейных систем. Содержание работы соответствует паспорту специальности 01.04.03 – Радиофизика.

### **Научная новизна**

При выполнении диссертационной работы автор решил большое число сложных логически связанных задач, что свидетельствует о высокой квалификации автора. Ольгой Игоревной получены научные результаты и разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как значимое научное достижение в

области радиофизики, в той ее области, которая связана с исследованием нелинейной динамики, пространственно-временного хаоса и самоорганизации в неравновесных сложных системах. В диссертационной работе изучены особенности явления обобщенной синхронизации в системах малой размерности, как с однонаправленным, так и взаимным типами связи, включая сети со сложной топологией связей между узловыми колебательными элементами, а также в пространственно-распределенных системах. Важно также отметить (и с точки зрения важности, и с точки зрения новизны) изложенные в диссертационной работе результаты по изучению влияния шума на различные аспекты поведения взаимодействующих нелинейных систем и характеристики соответствующих динамических режимов. Несомненной новизной обладают результаты исследования, свидетельствующие о единстве двух типов перемежающегося поведения, считавшихся различными явлениями (перемежаемость типа I в присутствии шума и перемежаемость игольного ушка), разработанный автором метод фазовых трубок, результаты исследования сосуществования различных типов перемежающегося поведения и другие научные результаты, содержащиеся в диссертационной работе. Отдельно следует отметить новизну результатов, полученных в ходе изучения особенностей поведения живых систем. Таким образом, на основании анализа диссертационной работы можно уверенно утверждать, что диссертационная работа Москаленко Ольги Игоревны обладает несомненной новизной и является научным достижением в области радиофизики, имеющим важные фундаментальное и прикладное значения для понимания и практического использования нелинейных процессов, возникающих при взаимодействии сложных систем.

### Содержание работы

Содержательная часть диссертационной работы Ольги Игоревны Москаленко состоит из введения, заключения и пяти глав, каждая из которых, является законченным исследованием определенной научной проблемы. Структура диссертационной работы такова, что материал, изложенный в предыдущих главах, является своеобразным фундаментом для исследований, представленных в последующих главах, диссертация обладает внутренней логикой и единством, материал работы хорошо и понятно изложен.

Во введении автор обосновывает актуальность выбранной темы диссертационной работы, формулирует цель работы, описывает научную новизну и практическую значимость полученных результатов, а также формирует общую идеологию диссертационной работы.

Первая глава диссертационной работы посвящена описанию результатов исследования обобщенной синхронизации в однонаправленно связанных хаотических системах, прежде всего, с точки зрения влияния шумов на различные аспекты синхронной динамики (в смысле обобщенной синхронизации) взаимодействующих систем. На примере динамических систем, как с малым числом степеней свободы, так и пространственно-распределенных рассмотрены вопросы, связанные с устойчивостью режима обобщенной синхронизации к воздействию шума, поведением взаимодействующих систем в зависимости от типа динамических режимов, реализующихся в парциальных (невзаимодействующих) системах, включая бинарные системы. Отдельно рассмотрены вопросы, связанные со способами скрытой передачи информации, основанными на явлении обобщенной хаотической синхронизации.

Во второй главе диссертационной работы центральным рассматриваемым вопросом является режим обобщенной хаотической синхронизации во взаимодействующих системах с взаимным типом связи. В данной главе автором предложена концепция обобщенной синхронизации, справедливая как для систем с однонаправленным, так и взаимным типами связи, включая сети нелинейных элементов. При этом, традиционная концепция обобщенной синхронизации, рассмотренная в главе 1, является частью

разработанной концепции. В данной главе автор обоснованно доказывает невозможность использования метода вспомогательной системы (который является чрезвычайно эффективным инструментом в случае однонаправленно связанных систем) в случае наличия в системе взаимодействующих осцилляторов взаимных (двунаправленных) связей, что автоматически влечет за собой невозможность использования данного метода для сетей элементов со сложной топологией связей (за исключением, быть может, строго иерархических сетей). Данный результат играет ключевую роль для теории обобщенной хаотической синхронизации нелинейных систем, поскольку до этого момента все известные на сегодняшний день исследования обобщенной хаотической синхронизации в системах с взаимным типом связи и сетях со сложной топологией связей (и, соответственно, все полученные и опубликованные результаты) полностью основывались на использовании данного метода. Сделанный в диссертационной работе вывод о невозможности применения метода вспомогательной системы с необходимостью приводит к вопросу о разработке/модификации методов анализа данного режима в системах с взаимным типом связи. В диссертационной работе установлено, что по аналогии со случаем однонаправленной связи анализ режима обобщенной синхронизации во взаимно связанных системах (включая сложные) может осуществляться при помощи расчета спектра показателей Ляпунова или при помощи метода ближайших соседей, а механизмы возникновения синхронного режима могут быть выявлены при помощи метода модифицированной системы. Стройная система полученных результатов и сформулированных теоретических положений, основанная на рассмотрении широкого круга различных динамических систем (системы с малым числом степеней свободы с непрерывным и дискретным временем, а также пространственно-распределенные системы с бесконечномерным фазовым пространством), составляет содержание второй части второй главы диссертационной работы.

Третья глава диссертационной работы посвящена пересмотру и уточнению существующей концепции обобщенной синхронизации однонаправленно и взаимно связанных систем и сетей связанных нелинейных элементов со сложной топологией межэлементных связей, необходимость которых однозначно диктуется результатами и выводами, приведенными во второй главе диссертации. В этой главе установлено, что состояния взаимодействующих систем, находящихся в режиме обобщенной синхронизации, оказываются связанными между собой при помощи функционала, а не функционального соотношения, как это считалось традиционно, что приводит к модификации метода ближайших соседей в метод фазовых трубок, учитывающий предысторию состояний взаимодействующих систем, а все остальные методы диагностики синхронного режима остаются неизменными. Полученные в третьей главе диссертационной работы результаты и сформулированные теоретические положения оказываются справедливыми для всех типов взаимодействующих нелинейных динамических систем (как с малым числом степеней свободы, так и с бесконечномерным фазовым пространством), за исключением, может быть, класса динамических систем с отклоняющимся аргументом (систем с запаздыванием).

В полном соответствии с поставленной целью и логикой диссертационной работы, заключающейся в систематичном изучении обобщенной хаотической синхронизации взаимодействующих систем, в четвертой главе диссертационной работы Ольга Игоревна переходит к рассмотрению перемежающегося поведения, являющегося неотъемлемой частью динамики систем при установлении/разрушении синхронного режима. В четвертой главе детально рассматриваются особенности и количественные характеристики различных типов перемежающегося поведения, ассоциированного с установлением (или разрушением) синхронной динамики взаимодействующих систем. Особо следует отметить описанный в данной главе диссертации метод оценки степени

синхронности перемежающейся фазовой синхронизации по временному ряду, основанный на оценке величины нулевого условного показателя Ляпунова, который применен как к модельным динамическим системам (что позволяет оценить работоспособность и точность предложенного метода), так и к нейрофизиологическим данным.

Наконец, в пятой главе диссертационной работы рассмотрен принципиально новый тип поведения нелинейных динамических систем, при котором в системе одновременно существуют (сосуществуют) два различных типа перемежающегося поведения, названный «перемежаемостью перемежаемостей». В диссертации получены закономерности, позволяющие количественно характеризовать данный тип динамического поведения в общем случае, а также рассмотрены несколько частных случаев сосуществования различных типов перемежающегося поведения, позволяющие говорить о справедливости найденных общих закономерностей и создающие общую картину данного явления в нелинейных взаимодействующих системах. Рассмотрение проведено для широкого круга сложных систем, принадлежащих к различным классам (с конечномерным и бесконечномерным фазовыми пространствами, дискретным и непрерывным временем), что позволяет говорить об универсальности сформулированных теоретических положений. Заключительная часть пятой главы посвящена изучению вопроса о сосуществовании различных типов перемежающегося поведения в системах физической и физиологической природы (легированный эрбием оптоволоконный лазер с модулированным параметром, сердечно-сосудистая и дыхательная системы человека, таламо-кортикальная сеть головного мозга крыс линии WAG/Rij), имеющих важное практическое значение.

В заключении автор делает общие выводы и подводит итоги диссертационной работы. Работа представляется очень взвешенной, выверенной, хорошо сбалансированной и вносит существенный вклад в понимание особенностей и закономерностей поведения взаимодействующих нелинейных систем со сложной динамикой.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность результатов диссертационной работы Москаленко Ольги Игоревны, на мой взгляд, не вызывает сомнений. Вся совокупность полученных результатов и сформулированных теоретических положений, представленных в диссертационной работе, формирует стройную и непротиворечивую картину сложного поведения взаимодействующих нелинейных систем. На протяжении всей диссертационной работы автор уделяет большое внимание аккуратному сопоставлению уже известных и вновь полученных результатов, что, с одной стороны, позволяет осознать, как результаты диссертации вписываются в общую научную картину и как они расширяют ее, а, с другой стороны, является важным подтверждением достоверности результатов и положений диссертационной работы. О скрупулезности и качественности такого подхода свидетельствует большое количество ссылок на использованные в ходе работы источники (445 наименований). Дополнительной гарантией достоверности полученных результатов является также использование апробированных, хорошо себя зарекомендовавших методов и моделей, а также хорошее соответствие полученных теоретических результатов с данными численного моделирования и с результатами экспериментальных исследований, продемонстрированное на протяжении всей диссертационной работы.

### **Научная и практическая значимость диссертационной работы**

Проведенные в рамках выполнения диссертационной работы научные исследования являются важными и представляют интерес как с фундаментальной, так и с практической точек зрения для широкого круга исследователей и специалистов. Научная значимость полученных результатов и разработанных теоретических положений диссертации не

вызывает сомнений, поскольку они способствуют глубокому пониманию поведения взаимодействующих нелинейных систем и возникающих при этом различных фундаментальных явлений. Результаты диссертационной работы широко востребованы научным сообществом, работающим в данном направлении – по данным системы «Сеть науки» (Web of Science) за последние пять лет результаты научных исследований, опубликованные в научных статьях О.И. Москаленко, были процитированы более 350 раз. Несомненно также, что результаты диссертационной работы можно использовать в учебно-образовательном процессе при подготовке бакалавров, магистров и аспирантов.

Результаты диссертации полно представлены научными публикациями, среди которых 2 монографии, 76 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в системы цитирования Web of Science, Scopus, РИНЦ, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук. По результатам выполнения исследований в рамках подготовки диссертационной работы автором получено 7 патентов Российской Федерации на изобретения, 15 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Автореферат правильно отражает содержание диссертационной работы.

### **По диссертационной работе имеются следующие замечания**

- На протяжении всей диссертационной работы автор старается показать общность полученных результатов и доказать их справедливость для широкого круга нелинейных систем (включая работу с экспериментальными данными), в который входят системы как с дискретным (отображения), так и непрерывным (поток) временем, системы с малым числом степеней свободы (описываемые системами обыкновенных дифференциальных уравнений малой размерности) и с бесконечномерным фазовым пространством (пространственно-распределенные системы). Однако системы с запаздыванием почему-то выпали из поля зрения автора и в диссертации им не уделено должного внимания. Поэтому рассмотрение нескольких таких систем в диссертационной работе только бы лишней раз подчеркнуло стройность и непротиворечивость полученных результатов.
- Хотя на сегодняшний день известно, что режим обобщенной хаотической синхронизации может наблюдаться и при взаимодействии различных систем, в том числе и систем с различной размерностью фазового пространства, в современной научной литературе такие случаи рассматриваются очень редко, хотя они также представляют определенный интерес, и, скорее всего, могут демонстрировать какие-то особенности, не возникающие в случае взаимодействия одинаковых систем (пусть и с различными значениями управляющих параметров). Автор диссертационной работы, судя по всему, также поддержал эту традицию, и случай обобщенной синхронизации (а также перемежающегося поведения на границе возникновения синхронного режима) при взаимодействии различных систем снова остался за кадром рассмотрения. Было бы очень неплохо, если бы этот вопрос был детально рассмотрен в рамках диссертационной работы.
- При рассмотрении перемежающегося поведения в четвертой и пятой главах диссертационной работы автор сосредотачивается на ламинарных фазах поведения (как это обычно и делается). Но что происходит с турбулентными (применительно к рассматриваемой проблематике – асинхронными) фазами поведения? Каковы их характеристики, как они зависят от значений управляющих параметров? Было бы неплохо пусть не так подробно, как для ламинарных фаз, но прояснить этот аспект сложной динамики нелинейных систем.

## Выводы

В заключение следует отметить, что диссертация Москаленко Ольги Игоревны производит приятное впечатление, написана хорошим научно-техническим языком, является полной и законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно с уверенностью квалифицировать как научное достижение в области радиофизики. Отмеченные выше недостатки работы не носят принципиального характера и поэтому не снижают ценности проведенных исследований, а скорее, подчеркивают ее масштабность и значимость.

Таким образом, по степени новизны, обоснованности и достоверности полученных научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, актуальности темы диссертационного исследования, практической значимости полученных результатов диссертация Москаленко Ольги Игоревны полностью удовлетворяет всем требованиям пп. 9-14 действующего «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ей ученой степени доктора физико-математических наук по специальности «01.04.03 – радиофизика».

## Официальный оппонент

главный научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук», доктор физико-математических наук



Волков Евгений Израилевич

Почтовый адрес: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, 53, телефон: +7(499) 132-69-78, e-mail: [volkov@lpi.ru](mailto:volkov@lpi.ru).

Подпись Волкова Е.И. заверяю

Ученый секретарь



Колобов А.В.