

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики Российской
академии наук» (ИПФ РАН)
академик РАН, д.ф.-м.н. Сергеев А.М.

"5" сентября 2017 г.

О Т З Ы В

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» 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», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика

Диссертационная работа Москаленко Ольги Игоревны посвящена изложению результатов исследования различных типов хаотической синхронизации и перемежающегося поведения, имеющего место вблизи их границ, в системах с малым числом степеней свободы, пространственно-распределенных средах и сетях связанных нелинейных элементов. Это направление научных исследований является в настоящее время актуальным и перспективным, привлекающим пристальное внимание отечественных и зарубежных исследователей, работающих в различных областях современной науки. При этом, несмотря на наличие большого количества активно цитируемых работ в данной области, далеко не все вопросы, связанные с исследованием хаотической синхронизации и связанной с ней явлениями, оказываются в настоящее время решенными. В настоящей диссертационной работе особое внимание уделено режиму обобщенной хаотической синхронизации, являющемуся наиболее интересным и наименее изученным как с фундаментальной, так и практической точек зрения, а также перемежающемуся поведению, наблюдающемуся вблизи границ синхронных режимов. В диссертационной работе получены принципиально новые научные результаты в области исследования обобщенной синхронизации как в однонаправленно и взаимно связанных системах, так и сложных сетях, а также описаны практические приложения в информационно-телекоммуникационных системах. Кроме того, в диссертации Москаленко О.И. разработаны новые методы и подходы к анализу синхронных режимов, которые в перспективе могут найти применение для решения широкого круга прикладных задач. Например, метод фазовых трубок и метод выделения характерных фаз поведения по временным рядам смогут найти применение при обработке экспериментальных данных (в частности, при исследовании радиофизических и физиологических систем). Таким образом, тема диссертационной работы Москаленко О.И. является актуальной и практически значимой.

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Диссертационная работа имеет логично организованную структуру и характеризуется четким и ясным изложением материала.

Во **введении** детально обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулирована цель работы, описаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Введение содержит основные положения и результаты, выносимые на защиту, сведения о достоверности и апробации результатов.

Первые три главы диссертационной работы посвящены изложению результатов исследования режима обобщенной синхронизации в связанных системах и сложных сетях. В **первой главе** диссертации рассмотрены некоторые неизученные ранее вопросы, касающиеся анализа этого режима в системах с однонаправленным типом связи, полученные на основе традиционной концепции обобщенной синхронизации. В начале главы изложена сама концепция обобщенной синхронизации, методы диагностики и механизмы возникновения этого режима в системах с диссипативным и недиссипативным типами связи, рассмотрен вопрос о взаимосвязи этого режима с другими типами синхронного поведения. Основное внимание в данной главе уделено изучению влияния шума на установление режима обобщенной синхронизации. Теоретически, численно и экспериментально установлено, что режим обобщенной синхронизации в диссипативно связанных хаотических системах обладает высокой устойчивостью по отношению к шумам. Режим обобщенной синхронизации обнаружен и в случае воздействия внешнего хаотического сигнала на периодическую систему, а также при взаимодействии бинарных систем. Показано, что во всех рассмотренных случаях режим обобщенной синхронизации оказывается также устойчивым по отношению к внешним шумам. Найдены практические применения режима обобщенной синхронизации в присутствии шума. Предложен ряд способов скрытой передачи информации на основе этого явления, обладающих принципиальными достоинствами по сравнению с известными аналогами.

Во **второй главе** диссертации традиционная концепция обобщенной синхронизации однонаправленно связанных систем расширена на системы с взаимным типом связи. Разработана непротиворечивая концепция обобщенной синхронизации, применимая как для двух однонаправленно и взаимно связанных систем, так и сетей связанных нелинейных элементов. Установлено, что метод вспомогательной системы, являющийся эффективным средством анализа обобщенной синхронизации в системах с однонаправленной связью, для взаимно связанных систем и сетей приводит к некорректным результатам, в то время как другие методы диагностики синхронного режима (метод расчета спектра показателей Ляпунова и метод ближайших соседей) оказываются справедливыми как в случае однонаправленной, так и взаимной связи. Выявлены механизмы возникновения обобщенной синхронизации в сложных сетях. Для выявления механизмов возникновения синхронного режима предложена модификация метода модифицированной системы применительно к сложным сетям.

Третья глава диссертационной работы посвящена пересмотру и уточнению существующей концепции обобщенной синхронизации как однонаправленно, так и взаимно связанных систем. С помощью рассмотрения различных классов динамических систем (поточковые динамические системы, дискретные отображения, пространственно-распределенные среды, сети связанных нелинейных элементов) установлена необходимость корректировки определения обобщенной синхронизации с учетом предыстории состояний взаимодействующих систем. Показано, что введенная корректировка влечет за собой модификацию метода ближайших соседей, в то время как остальные методы диагностики синхронного режима (метод расчета спектра показателей Ляпунова, метод вспомогательной системы для случая однонаправленной связи) остаются по-прежнему справедливыми. Предложен метод фазовых трубок, являющийся альтернативой

метода ближайших соседей с учетом предыстории состояний взаимодействующих систем, и показана его эффективность.

Две последующие главы диссертационной работы направлены на изложение результатов анализа перемежающегося поведения, имеющего место вблизи границ возникновения синхронных режимов, а также изучение возможности одновременного существования двух различных типов перемежаемости в нелинейных системах. Так, **четвертая глава** представляет собой своего рода обзор как известных, так и оригинальных авторских результатов в области исследования перемежающегося синхронного поведения и методов анализа статистических характеристик перемежаемости. В этой главе существующая классификация типов перемежаемости, наблюдающихся вблизи границ синхронных режимов, дополнена новыми результатами. В частности, перемежаемость типа «on-off» обнаружена не только вблизи границ полной синхронизации, синхронизации с запаздыванием, обобщенной синхронизации, но и на границе синхронизации, индуцированной шумом. В диссертационной работе установлено, что режимы перемежаемости «игольного ушка», наблюдаемой на границе фазовой синхронизации неавтономных и связанных хаотических систем, и перемежаемости типа I в присутствии шума, имеющей место в закритической области значений управляющих параметров неавтономных периодических систем, подверженных дополнительному шумовому воздействию, представляют собой единый тип перемежающегося поведения. Перемежаемость «кольца», традиционно наблюдаемая на границе фазовой синхронизации в хаотических системах в случае относительно большой расстройки между ними, обнаружена также в режиме фазовой синхронизации на граничных временных масштабах наблюдения. В этой главе исследовано также перемежающееся поведение, индуцированное шумом, в бистабильных системах.

Одним из наиболее важных результатов, полученных в четвертой главе диссертации, является разработанный автором метод оценки степени синхронности перемежающейся фазовой синхронизации по временным рядам. Метод основан на оценке величины нулевого условного показателя Ляпунова по временному ряду, в роли которого выступает временная зависимость разности фаз взаимодействующих систем. Метод оказывается работоспособным и в режиме фазовой синхронизации, позволяя оценить степень синхронности данного режима. Метод применен как к модельным системам, так и реальным нейрофизиологическим данным, что показано на примере анализа электроэнцефалограммам крыс, имеющих генетическую предрасположенность к эпилепсии.

В **пятой главе** диссертационной работы изложены результаты исследования возможности одновременного существования двух различных типов перемежаемости в нелинейных системах. Такой тип поведения, названный автором «перемежаемостью перемежаемостей», обнаружен им как в модельных, так и реальных системах. В данной главе предложена общая теория «перемежаемости перемежаемостей» и проведена ее верификация на модельных системах с дискретным временем, потоковых динамических системах и пространственно-распределенных средах. «Перемежаемостью перемежаемостей» обнаружена также в связанных хаотических осцилляторах, находящихся вблизи границы фазовой синхронизации, в присутствии шума, при рассмотрении динамики этих систем на граничных временных масштабах наблюдения, а также в том случае, если на выходе одной из систем находится дополнительный полосовой фильтр. Кроме того, найдены реальные физические и нейрофизиологические системы, способные демонстрировать два типа перемежаемости одновременно. Во всех случаях найдены статистические характеристики «перемежаемости перемежаемостей», получено хорошее соответствие результатов численных/экспериментальных исследований и теоретических закономерностей.

Основные результаты работы и выводы компактно сформулированы в **заключении**. Анализируя их, можно выделить следующие наиболее интересные моменты:

- разработана концепция обобщенной синхронизации в системах с однонаправленным и взаимным типами связи и сложных сетях и проведена ее корректировка с учетом предыстории состояний взаимодействующих систем;
- выявлена устойчивость режима обобщенной синхронизации по отношению к внешним шумам и предложены способы скрытой передачи информации на основе режима обобщенной синхронизации в присутствии шума, обладающие принципиальными достоинствами по сравнению с известными аналогами;
- обнаружены новые типы перемежаемости вблизи границ возникновения синхронных режимов (перемежаемость типа on-off на границе синхронизации, индуцированной шумом, перемежаемость кольца в режиме фазовой синхронизации на граничных временных масштабах наблюдения и др.);
- разработан универсальный метод оценки степени синхронности поведения взаимодействующих систем по временным рядам и показана его работоспособность при обработке нейрофизиологических данных;
- построена общая теория, описывающая одновременное существование двух различных типов перемежаемости в нелинейных системах, и найдены конкретные физические и нейрофизиологические системы, демонстрирующие данный тип поведения.

Достоверность результатов и выводов диссертационной работы основывается на соответствии аналитических оценок и результатов численного моделирования и/или экспериментальных исследований, использовании апробированных численных методов решений алгебраических, разностных и дифференциальных уравнений, а также отсутствием противоречий с известными в литературе данными.

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

- 1 Во второй главе диссертационной работы при изложении результатов исследования обобщенной синхронизации в потоковых динамических системах и пространственно-распределенных средах, связанных взаимно, уделяется большое внимание поведению ближайших соседей и их образов в фазовом пространстве взаимодействующих систем, в то время как для систем с дискретным временем результаты оказываются менее иллюстративными. Рассмотрение было бы более полным, если бы аналогичные иллюстрации были приведены и для систем с дискретным временем.
- 2 В качестве примеров пространственно-распределенных систем, способных демонстрировать тот или иной тип поведения, в диссертационной работе рассматриваются, как правило, модели однонаправленно или взаимно связанных диодов Пирса, характеризующихся в автономном режиме, как было установлено в диссертационной работе, одним положительным показателем Ляпунова, что является вырожденным случаем для пространственно-распределенных систем. Представляется интересным вопрос о том, какие особенности будут наблюдаться в поведении пространственно-распределенных систем, если они будут характеризоваться несколькими положительными показателями Ляпунова, особенно с точки зрения установления режима обобщенной синхронизации.

- 3 В первой главе диссертационной работы при анализе эффективности способов скрытой передачи информации на основе обобщенной синхронизации в присутствии шума в качестве моделей генераторов передающего и принимающего устройств рассматриваются, как правило, однонаправленно связанные системы Ресслера. Хотя выбор данной модели достаточно хорошо обоснован в диссертационной работе, представляется интересным вопрос о том, каким образом будут вести себя эти способы при использовании других генераторов в передающем и принимающем устройствах.

В то же время, отмеченные недостатки не снижают общей положительной оценки диссертационной работы О.И. Москаленко, которая выполнена на высоком уровне.

Заключение

Диссертационная работа Москаленко Ольги Игоревны является законченным научным исследованием, выполненным на актуальную для радиофизики тему, совокупность теоретических положений, разработанных в котором можно квалифицировать как научное достижение. Диссертация соответствует специальности 01.04.03 – радиофизика (пп. 1,4 паспорта специальности). Автореферат правильно отражает ее содержание.

По результатам диссертационной работы опубликовано 2 монографии и 76 статей в центральных рецензируемых отечественных и зарубежных научных журналах, входящих в международные системы научного цитирования Web of Science/Scopus, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук: Успехи физических наук, Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики, Журнал экспериментальной и теоретической физики, Physical Review Letters, Applied Physics Letters, Physical Review B, Physical Review E, European Physical Journal B, European Physical Journal (Special Topics), Nonlinear Dynamics, Physics Letters A, Chaos, Solitons & Fractals и др. Разработанные в диссертационной работе технические решения защищены 7 патентами Российской Федерации на изобретения, а на предложенные методы и подходы получено 15 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Работа прошла всестороннюю апробацию на многочисленных отечественных и международных научных конференциях.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в научных исследованиях в Институте прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород), Институте радиотехники и электроники РАН (г. Москва), Физическом институте имени П.Н. Лебедева РАН (г. Москва), Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, Национальном исследовательском Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского, Воронежском государственном университете, Казанском (Приволжском) федеральном университете, Южном федеральном университете, Санкт-Петербургском государственном университете, Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Национальном исследовательском Томском государственном университете, Поволжском государственном университете телекоммуникаций и информатики, Иркутском государственном университете, а также могут быть рекомендованы к внедрению в учебный процесс в высших учебных заведениях Российской Федерации, ведущих подготовку специалистов (бакалавров, магистров, аспирантов) в области радиофизики.

С учетом вышесказанного можно полагать, что диссертационная работа Ольги Игоревны Москаленко вносит актуальный вклад в развитие теории и приложений хаотической синхронизации как одного из разделов современной радиофизики и удовлетворяет требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемых к докторским диссертациям, а сама Ольга Игоревна заслуживает присуждения ей ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика.

Отзыв составлен и утвержден на заседании семинара Отдела Нелинейной Динамики (протокол № 5 от 05.09.2017 года).

Председатель семинара



Некоркин Владимир Исаакович
д.ф.-м.н., профессор, заведующий отделом
нелинейной динамики ИПФ РАН,
почтовый адрес: 603950, г. Нижний
Новгород, ул. Ульянова, 46,
тел. 7(831) 436-72-91
e-mail: vnekorkin@neuron.appl.sci-nnov.ru

Научный секретарь семинара



Клиньшов Владимир Викторович,
к.ф.-м.н., старший научный сотрудник
ИПФ РАН,
почтовый адрес: 603950, г. Нижний
Новгород, ул. Ульянова, 46
тел. 7(831) 416-49-05
e-mail: vladimir.klinshov@gmail.com