

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию 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

Диссертационная работа Москаленко Ольги Игоревны посвящена решению актуальной задачи радиофизики, связанной с изучением хаотической синхронизации и ее возможных практических приложений. Такое направление научных исследований является в настоящее время важным, перспективным, привлекающим большое внимание исследователей, работающих не только в области радиофизики, но и других смежных областях науки и техники, о чем свидетельствует наличие большого количества активно цитируемых работ, посвященных как хаотической синхронизации в целом, так и ее приложениям в информационно-телекоммуникационных системах и нейронауке. Именно на этих вопросах и сосредоточена докторская диссертация Ольги Игоревны. Диссертационная работа характеризуется органичным сочетанием фундаментальных аспектов изучаемого явления и их возможных приложений, что свидетельствует об актуальности темы диссертационного исследования и полученных в нем результатов. Диссертация соответствует специальности 01.04.03 – радиофизика (пп. 1,4 паспорта специальности) и, как отмечалось выше, является актуальной, современной и практически значимой.

Диссертация (общий объем 435 стр., включая 122 иллюстрации и 4 таблицы) состоит из введения, пяти глав и заключения. Список литературы содержит 445 наименований.

Во введении к диссертации автором хорошо обоснована актуальность и научная значимость диссертационного исследования, определены цели и задачи работы, отмечены научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации и публикации результатов.

Оригинальный материал диссертационного исследования изложен в пяти главах. В первых трех главах рассматриваются результаты исследования обобщенной синхронизации в системах с однонаправленным и взаимным типами связи, а также в сетях связанных нелинейных элементов. Четвертая и пятая главы посвящены изложению результатов исследования перемежающегося поведения, имеющего место вблизи границ существования синхронных режимов, включая возможность одновременного сосуществования двух различных типов перемежаемости.

Построение всех глав подчиняется одному и тому же принципу: в начале дается краткий обзор известных результатов по изучаемому вопросу, а затем

излагается оригинальный материал, содержащий как результаты фундаментальных исследований, так и рекомендации по их использованию на практике.

Так, **в первой главе** диссертационной работы рассматривается явление обобщенной синхронизации в однонаправленно связанных системах. Важно отметить, что несмотря на то, что этот режим известен с 1995 года, и для него уже получено много результатов, систематизированных автором в обзорной части этой главы, оригинальный материал диссертации содержит исключительно новые результаты, полученные в данной области. В частности, автором впервые исследованы вопросы о влиянии шума на установление режима обобщенной синхронизации, о возможности наблюдения этого режима в случае взаимодействия периодических и хаотических систем, а также в бинарных системах, найдены практические приложения изучаемого явления, в том числе при наличии внешних шумов. Важно отметить, что разработанные практические решения, предложенные в данной главе, защищены патентами Российской Федерации на изобретения. В частности, автором предложены 3 способа скрытой передачи информации на основе режима обобщенной синхронизации в присутствии шума.

Вторая глава диссертации является логичным продолжением первой главы и направлена на изучение режима обобщенной синхронизации в системах с взаимным типом связи (двух взаимно связанных системах и сетях нелинейных элементов). В данной главе автором предложена концепция обобщенной синхронизации в таких системах, при этом установлено, что традиционный случай однонаправленной связи является частным случаем разработанной концепции. Автором предложены (модифицированы) методы диагностики режима обобщенной синхронизации во взаимно связанных системах, выявлены механизмы возникновения синхронного режима. Показано, что при взаимной связи не работает метод вспомогательной системы, являющийся эффективным средством анализа обобщенной синхронизации в системах с однонаправленной связью.

В третьей главе проведена корректировка и уточнение существующей концепции обобщенной синхронизации, как применительно к системам с однонаправленным типом связи, так и к взаимно связанным системам и сетям. Данная корректировка, заключающаяся в установлении функционала, а не функциональной связи, между состояниями взаимодействующих систем, приводит к модификации (уточнению) лишь одного метода диагностики синхронного режима, при этом все остальные методы и подходы остаются работоспособными. Взамен метода ближайших соседей автором предложен метод фазовых трубок для диагностики обобщенной синхронизации с учетом введенной корректировки. Метод является эффективным средством анализа различных классов систем с разным типом связи и может быть применен к реальным экспериментальным данным, полученным для систем различной природы, что говорит о возможности его использования на практике.

Четвертая глава посвящена описанию результатов исследования перемежающегося поведения, наблюдающегося вблизи границ существования

синхронных режимов. По аналогии с главой 1, в обзорной части главы проведена систематизация известных результатов в данной области и четко обозначены вопросы, требующие дальнейшего изучения. Ответы на них даны в содержательной части главы. Так, в этой главе определены типы перемежаемости, имеющие место на границе синхронизации, индуцированной шумом, и в режиме фазовой синхронизации на граничных временных масштабах наблюдения; исследованы вопросы о взаимосвязи различных типов перемежаемости друг с другом и проявлении их в мультистабильных системах, рассмотрен вопрос об оценке степени синхронности перемежающейся фазовой синхронизации по временным рядам. В данной главе разработан метод оценки величины нулевого условного показателя Ляпунова по временному ряду и проведена его апробация на модельных системах и реальных нейрофизиологических данных.

В пятой главе приведены результаты исследования возможности одновременного сосуществования двух различных типов перемежаемости, в том числе вблизи границ синхронных режимов. Сконструированы модельные системы с непрерывным и дискретным временем, а также модели пространственно-распределенных систем, способные демонстрировать два различных типа перемежаемости одновременно (так называемый режим перемежаемости перемежаемостей). Перемежаемость перемежаемостей обнаружена также вблизи границы фазовой синхронизации в присутствии шума, в связанных системах с дополнительным полосовым фильтром, в реальных физических и нейрофизиологических системах. В данной главе рассмотрена общая теория одновременного существования двух различных типов перемежаемости и проведена ее успешная верификация на системах, упомянутых выше.

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

Достоверность и обоснованность научных результатов и выводов, приведенных в диссертации О.И. Москаленко и прошедших многочисленные апробации на представительных международных и всероссийских научных конференциях, обеспечиваются адекватностью используемых математических моделей, строгостью применяемых методов нелинейной динамики, согласованностью представленных теоретических выводов, качественных интерпретаций и результатов численного моделирования и/или экспериментальных исследований, качественным (а в ряде случаев и количественным) совпадением полученных результатов с отдельными результатами исследований, известными из литературы. Основное содержание диссертации опубликовано в научной печати в 100 работах (не считая трудов конференций и семинаров), включая 2 монографии и 76 статей в высокорейтинговых научных журналах, входящих в международные системы научного цитирования Web of Science/Scopus, рекомендованных ВАК России для опубликования основных научных результатов докторских диссертаций, 7 патентов на изобретения и 15 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Новизна исследований О.И. Москаленко связана с серией результатов в области исследования обобщенной синхронизации в двух однонаправленно или взаимно связанных системах и сложных сетях (концепция обобщенной синхронизации с учетом предыстории состояний взаимодействующих систем, устойчивость синхронного режима по отношению к шумам, практические приложения этого режима в информационно-телекоммуникационных системах, а также серия методов по анализу данного режима в системах различной природы), с новыми типами перемежаемости, обнаруженными вблизи границ синхронных режимов (перемежаемость типа on-off на границе синхронизации, индуцированной шумом, перемежаемость кольца в режиме фазовой синхронизации на граничных временных масштабах и др.) и разработанными методами их анализа, а также с обнаруженными закономерностями одновременного сосуществования двух различных типов перемежаемости в модельных и реальных системах, в том числе вблизи границ синхронных режимов.

Научно-прикладная значимость диссертации заключается в разработке теоретических положений, формулирующих общие закономерности различных типов хаотической синхронизации и перемежающегося поведения, имеющего место на их границах, в неавтономных и связанных системах и сложных сетях, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области радиопизики. Прикладная значимость результатов диссертации подтверждена 7 патентами Российской Федерации на изобретения. Полученные в диссертации результаты могут быть востребованы в высокотехнологичных отраслях экономики, например, при разработке информационно-телекоммуникационных систем, при автоматизированном проектировании на предприятиях систем связи, основанных на явлении хаотической синхронизации, а также при исследовании процессов синхронизации объектов биофизики и биомедицины.

Несомненными достоинствами диссертационной работы О.И. Москаленко являются органичное сочетание строгих аналитических методов и численного моделирования и/или натурального эксперимента, что позволило автору создать в диссертации гармоничное представление об изучаемых явлениях, а также содержательное описание и четкая трактовка результатов исследований, оценка их возможных практических приложений. Диссертация написана четким и понятным языком, хорошо иллюстрирована.

Основные положения, высказанные автором по результатам проведенных исследований, не вызывают существенных замечаний. По самому содержанию диссертации имеются следующие замечания:

1. При исследовании перемежающегося поведения, имеющего место на границе/в режиме фазовой хаотической синхронизации, в том числе на граничных временных масштабах наблюдения или в присутствии внешних шумов, автор ограничивается рассмотрением случая относительно слабой частотной расстройки между взаимодействующими системами. В то же самое время, как справедливо отмечает автор в разделе 4.2 диссертационной

работы, тип перемежаемости, наблюдаемый на границе данного режима, зависит существенным образом от величины расстройки между этими системами. Представляется интересным вопрос о том, что же будет происходить во взаимодействующих системах, находящихся вблизи границы фазовой синхронизации, в случае относительно большой расстройки между ними?

2. В четвертой главе диссертационной работы автор уделяет большое внимание методу оценки степени синхронности перемежающейся фазовой синхронизации по временному ряду, предлагая метод, основанный на оценке величины так называемого условного нулевого показателя Ляпунова. В то же самое время, другим типам перемежающегося синхронного поведения уделяется значительно меньше внимания. Возникает вопрос, возможно ли оценить степень синхронности других типов поведения (например, перемежающейся обобщенной синхронизации) по временному ряду аналогичным способом?
3. Мне не совсем нравится терминология, используемая автором в некоторых случаях. В частности, нулевой условный показатель Ляпунова, о котором упоминалось в рамках предыдущего замечания, в режиме перемежающейся фазовой синхронизации оказывается уже отрицательным. Несмотря на то, что такая терминология является вполне понятной и общепринятой, на мой взгляд, было бы целесообразно использовать другой термин для обозначения этого показателя Ляпунова в той области, где он принимает отрицательные значения.
4. На мой взгляд недостаточно внимания уделено анализу бифуркаций, происходящих при установлении и срыве изучаемых синхронных режимов.

Сделанные замечания не касаются основных идей и результатов автора, изложенных в диссертации, и не влияют на общую высокую оценку работы. Диссертация О.И. Москаленко представляет собой законченную научно-исследовательскую работу в области радиофизики, теоретические положения разработанные в которой можно квалифицировать как научное достижение. Основное содержание диссертации достаточно полно опубликовано в больше 100 научных работах автора, включая 2 монографии и 76 статей в престижных научных журналах, таких как, например, *Physical Review Letters*, *Physical Review B*, *Physical Review E*, *Applied Physics Letters*, *Physics of Plasmas*, *Nonlinear Dynamics*, *Physics Letters A*, *Chaos*, *Solitons & Fractals*, *Успехи физических наук*, *Письма в ЖЭТФ*, *ЖЭТФ*, *Письма в ЖТФ* и др., результаты работы апробированы на различных российских и международных 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, опирающихся на обработку экспериментальных данных.

Автореферат содержит всю необходимую информацию и адекватно отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа Москаленко Ольги Игоревны содержит необходимую совокупность оригинальных научных результатов, обобщений и выводов и 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, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ей ученой степени доктора физико-математических наук по специальности «01.04.03 – радиофизика».

Официальный оппонент

Заведующий кафедрой теории управления и динамики систем федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», д.ф.-м.н. Осипов Григорий Владимирович

Почтовый адрес: 603950, г. Нижний Новгород, проспект Гагарина, 23, телефон: +7(831) 462-33-57, e-mail: osipov@vmk.unn.ru

Проректор по научной работе



/Казанцев В.Б./