

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента о диссертации  
Сысоева Ильи Вячеславовича  
«Специализированные подходы к реконструкции ансамблей сложных  
колебательных систем по временным рядам»,  
представленной на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук по специальности  
01.04.03 — Радиофизика**

### **Актуальность темы диссертации**

Диссертационная работа посвящена задаче реконструкции по экспериментальным данным различной природы подходящей математической модели. Выбор моделей осуществляется в некотором классе систем дифференциальных уравнений с запаздыванием. В настоящее время имеется огромное количество устройств, накапливающих данные о различных процессах и явлениях. Обработка этих данных с целью получения адекватной математической модели процесса представляет крайне важную для всевозможных приложений задачу. Особенно широкое применение разрабатываемые автором методы могут найти в биофизических и медицинских приложениях, в частности, для анализа электроэнцефалограмм и реконструкции эмпирических нелинейных моделей нейронных ассоциаций. Таким образом, рассмотренные в диссертационной работе вопросы относятся к числу **актуальных направлений исследования**, имеющих несомненный теоретический и практический интерес.

### **Обзор основных результатов диссертации**

Диссертация (общий объём 336 страниц) состоит из введения, шести глав, и заключения. Список использованной литературы включает в себя 239 наименований.

**Во введении** обоснованы актуальность и научная значимость диссертационного исследования, определены цели и задачи работы, отмечена научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, сформулированы основные положения и результаты, выносимые на защиту, приведены необходимые сведения об апробации и публикации результатов, представляется и поясняется объект исследования – сети сложно организованных систем различной природы, в том числе сети радиотехнических генераторов периодических и хаотических колебаний с запаздыванием и без запаздывания и их математические модели.

**В первой главе** рассматриваются различные подходы к реконструкции связанных дифференциальных уравнений с запаздыванием по их временным реализациям. Основное внимание уделяется реконструкции ансамблей из нескольких (6-20) осцилляторов, каждый из которых описывается нелинейным уравнением с запаздыванием первого порядка с линейными связями между ними. Для такого класса систем предлагаются два сходных по идее и различных в деталях реализации метода реконструкции. Оба метода основаны на идее построения целевой функции (она используется для определения параметров осциллятора и коэффициентов связи) для каждого осциллятора ансамбля в отдельности на основе гладкости описания неизвестной нелинейной функции в уравнении для собственной динамики данного осциллятора. Методы различаются конкретным выбором целевой функции и алгоритмом оптимизации (в одном случае используется симплекс-метод, во втором — линейный МНК). Оба метода также позволяют детектировать отсутствующие (коэффициент связи равен 0) связи в ансамбле. Работоспособность методики проверяется в численном и радиофизическом (натурном) эксперименте. Дополнительно рассматривается задача о двух однонаправленно связанных таких же осцилляторах с запаздыванием, для которых сигнал ведущего осциллятора нельзя измерить. Для этого случая предлагается специализированный подход, позволяющий реконструировать как параметры ведущего и ведомого осцилляторов, так и коэффициент связи между ними и реализацию ведущего осциллятора, если нелинейная функция обоих осцилляторов известна или может быть легко параметризована. Также рассмотрена задача о реконструкции осциллятора с запаздыванием под внешним регулярным воздействием.

**Во второй главе** предлагается подход к восстановлению параметров сетей осцилляторов, описываемых обыкновенными дифференциальными уравнениями первого и второго порядка, в том числе с запаздыванием в связях и с нелинейными связями, по временным рядам колебаний всех элементов сети (от каждого элемента имеется только скалярная реализация). Из первой главы переносится идея о построении целевой функции для последующей оптимизации на основе длины описания одной из нелинейных функций собственной динамики. Другие нелинейные функции при этом аппроксимируются явно путём разложения в ряды или представления в кусочно-линейном виде на интервале наблюдения. Также рассматривается случай, когда нелинейные функции связи принадлежат к какому-либо известному классу, например, сигмоидных функций. В таком случае

применяется процедура нелинейной оптимизации. В данной главе рассмотрены примеры систем, имеющих значимое практическое приложение или относящиеся к классическим моделям радиофизики: в качестве узлов сети выступают осцилляторы Ван дер Поля, Рэлея, Бонхёффера – Ван дер Поля (модели нейронов ФитцХью-Нагумо), релаксаторы, описывающие эволюцию частоты бёрстинга нейронов. Для случая осцилляторов, связанных с запаздыванием, предлагается подход к реконструкции всех времён запаздывания для каждого осциллятора системы. Работоспособность предложенных подходов показана на сетях различных динамических систем в большом числе численных экспериментов. Для ряда случаев аналитически получена асимптотическая оценка точности метода.

**В третьей главе** рассматривается ситуация, когда уравнения для отдельных взаимодействующих подсистем не могут быть записаны из первых принципов с достаточной степенью подробности, чтобы можно было применить методы, описанные в главах 1 и 2. Поэтому используется более универсальный подход, основанный на построении авторегрессионных моделей и получивший в литературе название «причинность по Грейнджеру». В представленной диссертационной работе используются нелинейные модели, в основном с полиномиальными нелинейностями. Для выбора размерности и лага вложения при реконструкции вектора состояния используется статистический критерий Шварца. Рассматривается главным образом задача о двух однонаправленно связанных осцилляторах, находящихся в хаотическом режиме, в колебаниях которых присутствует характерный временной масштаб. В результате работы сформулированы критерии выбора параметров метода, позволяющие улучшить его чувствительность и специфичность (уменьшить число ложно положительных выводов о связях и число ложно отрицательных выводов) для рассмотренного класса объектов. Критерии апробированы на большом числе математических моделей радиофизических генераторов хаоса и других системах.

**В четвёртой главе** полученные ранее результаты подвергнуты тестированию в случае различных помех и воздействий: высокочастотных шумов, общих низкочастотных помех, опосредованных взаимодействий. В частности, рассмотрен и объяснён эффект возможного роста основного показателя метода причинности по Грейнджеру — нормированного улучшения прогноза — с ростом измерительного шума. Рассмотрено, насколько общая измерительная низкочастотная по отношению к основному ритму колебаний изучаемых осцилляторов помеха способна исказить выводы о связанности,

исследования проведены для разного отношения частот помехи и основной частоты колебаний ведомого осциллятора, при разной амплитуде помехи. Показано, что при некоторой умеренной амплитуде помехи её фильтрация скорее вредит чувствительности метода и лучшие результаты могут быть получены без фильтрации путём настройки параметров метода. Рассмотрены архитектуры из 3 связанных осцилляторов, на примере моделей радиофизических генераторов хаоса, описываемых как обыкновенными дифференциальными уравнениями, так и уравнениями с запаздыванием, при различной силе связей продемонстрирована возможность различения прямого и опосредованного взаимодействий.

**В пятой главе** рассмотрены несколько вопросов о надёжности выводов о связанности. Во-первых, исследованы различные подходы к генерации суррогатных временных рядов для тестирования значимости полученных методом причинности по Грейнджеру выводов о связанности. Во-вторых, рассмотрено, насколько фазовая синхронизация объектов может воспрепятствовать детектированию направления взаимодействия. В-третьих, рассмотрена возможность применения разработанного подхода в скользящем временном окне, в том числе исследованы эффекты, к которым приводит вариация длины окна и наличие в сигнале переходных процессов. Все эти результаты получены на различных классических моделях радиофизики в ансамблях из 2-4 осцилляторов с разным, в том числе нелинейным и параметрическим типом связи.

**В шестой главе** приведён пример приложения разработанного метода к задаче оценки связанности по сигналам электроэнцефалограмм крыс и людей. Использована методология, разработанная в предыдущих главах и позволяющая за счёт учёта априорной информации об объектах, спектральных и корреляционных свойствах сигналов уменьшить число коэффициентов модели. Кроме того, это позволяет увеличить её чувствительность и специфичность при применении для коротких временных рядов. Таким образом, удалось повысить надёжность оценок связанности и впервые добиться временного разрешения, достаточного для детектирования процессов в связях, предшествующих на коротких временах (порядка 2-0,5 с) началу эпилептического приступа. Также была успешно решена задача о выявлении по ЭЭГ асимметрии связей в мозге у пациента с односторонним детским церебральным параличом, и о диагностике эволюции этой асимметрии вследствие терапии.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы по работе.

Таким образом, данная диссертация представляет собой комплексное исследование, полностью соответствующее специальности 01.04.03 — Радиопизика, по которой она представлена к защите, а полученные в диссертации результаты соответствуют пунктам 4,5,7 паспорта данной специальности.

### **Критический анализ диссертации**

**Достоверность и обоснованность** научных результатов и выводов, приведенных в диссертации Сысоева И.В., обеспечиваются корректным применением используемого математического аппарата и численных методов, согласованностью представленных теоретических выводов, качественных и количественных интерпретаций с результатами экспериментальных исследований, верифицирующих рассмотренные направления работ.

Представление результатов прошло апробацию на представительных международных и всероссийских научных конференциях. Основное содержание исследований опубликовано в научной печати в 26 научных работах, включая 24 статьи в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, из них 16 статей в международных журналах, индексируемых в базах Web of Science и Scopus, включая такие значимые в данной области, как Chaos, Physical Review E, ЖЭТФ, Physica D и др. Отметим **научно-прикладную значимость** исследования в области разработки методов исследования сложных систем биологической природы по их экспериментальным данным. Эти методы могут быть адаптированы для применения в других отраслях естественных наук и рекомендованы для непосредственного применения в организациях, включенных в исследования в соответствующих отраслях.

**Новизна** исследований связана с новыми подходами к реконструкции ансамблей осцилляторов с запаздыванием. Развитие этих подходов позволило продемонстрировать возможность реконструкции неавтономных уравнений с запаздыванием. Достоинствами диссертационной работы являются сочетание строгих математических методов, цифровой обработки сигналов и натурального эксперимента, что позволило Сысоеву И.С. создать в диссертации целостное представление об изучаемых объектах. Диссертация написана чётким и понятным языком, хорошо иллюстрирована.

Основные положения, высказанные автором по результатам проведённых исследований, не вызывают вопросов. Отметим некоторые **замечания**, возникшие при анализе диссертации.

1. Для систем с запаздыванием, изучаемых в работе, особенно в случае однонаправленной связи, часто характерна мультистабильность и сложная структура бассейнов притяжения аттракторов. В частности, у однонаправленно связанных систем при увеличении запаздывания может сосуществовать достаточно большое количество устойчивых режимов. В тексте работы не обсуждается вопрос, в какой степени свойство мультистабильности модели влияет на возможность ее реконструкции.
2. В процессе реконструкции автор получает динамические системы с большими значениями параметра запаздывания. В таких случаях к ним можно применить асимптотические методы изучения динамики решений. Было бы целесообразно использовать такую дополнительную информацию для улучшения реконструируемой системы.

Два замечания технического характера:

1. Первое из них связано с названием модели из работ Mackey M., Glass L. Автор называет ее уравнение Макея–Гласса, в то время как, на мой взгляд, следовало бы Мэкки–Гласса.
2. Второе замечание касается списка работ автора, приведенного в автореферате. Их, на мой взгляд, следовало пронумеровать отдельно от списка литературы, использованной в автореферате.

Сделанные замечания не касаются основных идей и результатов автора и не влияют на общую высокую оценку работы, относясь преимущественно к представлению материалов.

### **Выводы**

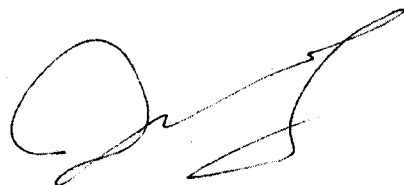
Оценивая диссертацию Ильи Вячеславовича Сысоева в целом, полагаю, что она представляет собой законченную научно-исследовательскую работу в области радиофизики и радиофизических приложений. Теоретические положения работы можно квалифицировать как научное достижение, а практические результаты, выносимые на защиту, могут быть рекомендованы к использованию в исследованиях прикладного и фундаментального характера как в области математических моделей, так и в более широкой области исследований, опирающихся на обработку экспериментальных сигналов сложных систем.

Автореферат содержит всю необходимую информацию и адекватно отражает содержание диссертации.

Суммируя, считаю, что диссертационная работа “Специализированные подходы к реконструкции ансамблей сложных колебательных систем по временным рядам” содержит необходимую совокупность оригинальных

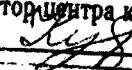
научных результатов, обобщений и выводов и удовлетворяет всем требованиям пп. 9 – 11, 13, 14 действующего «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденном постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (в редакции 2017 г.), предъявляемых к докторским диссертациям, а её автор, Сысоев Илья Вячеславович, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 — Радиофизика (физико-математические науки).

Официальный оппонент  
Доктор физико-математических наук,  
профессор,  
заведующий кафедрой компьютерных сетей  
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный  
университет им. П.Г. Демидова»  
«29» апреля 2019 г.



Глызин Сергей Дмитриевич



Подпись заверяю:  
Заместитель начальника управления-  
директор центра кадровой политики  
 Л.Н. Куфирина

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова»  
Почтовый адрес: 150003, г. Ярославль, ул. Советская, д. 14;  
телефон: +7(910)9626236;  
электронная почта: [glyzin.s@gmail.com](mailto:glyzin.s@gmail.com)