

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Сысоева Ильи Вячеславовича  
«Специализированные подходы к реконструкции ансамблей сложных  
колебательных систем по временным рядам»,  
представленную на соискание учёной степени доктора физико-  
математических наук по специальности 01.04.03 — Радиофизика

Решение задачи о восстановлении уравнений динамики ансамбля осцилляторов по экспериментальным реализациям колебаний отдельных элементов имеет большую практическую **значимость**, поскольку позволяет надеяться на решения ряда задач радиофизики и смежных областей (биофизики, климатологии), связанных с определением изменений в эволюции сложных систем, обусловленных их взаимодействием. В частности, к этой области относятся задачи об определении взаимодействия в сетях датчиков и сенсоров, взаимного влияния процессов изменений концентрации парниковых газов и солнечной активности, эволюции связей между отделами мозга и другими системами организма человека и животных, сопутствующей развитию разного рода патологических состояний. В настоящее время эта тематика привлекает внимание большого числа исследователей, что подтверждает **актуальность** диссертационной работы И.В. Сысоева.

В работе предлагается новый подход к построению уравнений для ансамблей осцилляторов различных типов по временным рядам их динамики, рассматриваются ситуации, когда исходные уравнения могут или не могут быть приближённо записаны из первых принципов. Получила значительное развитие тема оценки статистической значимости полученных результатов, как на основе известных статистических критериев (Фишера, Шварца), так и с использованием суррогатных данных. Таким образом, **новизна** работы не вызывает сомнений.

**Структура и содержание работы.** Работа состоит из 6 глав, связанных между собой как объектами исследования, так и методами.

**Первая и вторая главы** посвящены реконструкции ансамблей при наличии некоторых априорных сведений о структуре уравнений для отдельных узлов. В частности, в первой главе рассматриваются ансамбли генераторов с запаздыванием первого порядка с различными собственными функциями нелинейности и различными связями. Предлагается подход к восстановлению собственных нелинейных функций всех элементов ансамбля и матрицы связей между ними, а также времён запаздывания и некоторых других параметров. Подход изложен в нескольких вариантах, что, видимо, обусловлено историческим фактором (он разрабатывался не одновременно), а также тем, что различные версии более или менее работоспособны в зависимости от того, насколько редкими являются связи в ансамбле и каково общее число элементов. Проводится тестирование подхода в численном и натурном эксперименте на сетях из 8-20 осцилляторов.

Вторая глава расширяет область применения предложенного в первой главе подхода на различные системы, описываемые обыкновенными дифференциальными уравнениями первого и второго порядка, в том числе с нелинейными связями и с запаздывающими связями. Рассматриваются ситуации, когда неизвестны несколько нелинейных функций в уравнениях для каждого из узлов сети, неизвестны нелинейные функции связи, неизвестны времена запаздывания в связях. В совокупности результаты глав 1 и 2 позволяют говорить о том, что предложенный подход имеет высокую общность, поскольку оказывается работоспособен для сетей осцилляторов и релаксаторов, описываемых уравнениями самого различного типа, а также позволяет использовать различные подходы к оценке значимости восстановленных связей.

**Главы 3-5** посвящены ситуации, когда уравнения для отдельного узла сети не могут быть с достаточной подробностью записаны из первых

принципов и поэтому используются эмпирические модели. В работе рассматриваются модели в виде разностных уравнений с полиномиальными и кусочно-линейными функциями. Главным образом, рассматриваются объекты, генерирующие хаотические колебания, но с одним основным временным масштабом. Для такого рода систем, к которым относятся многие популярные радиотехнические генераторы хаоса, проводятся многочисленные тесты, основная цель которых — выбрать параметры метода, отвечающие как можно меньшему числу ложно положительных срабатываний и при этом позволяющие детектировать реально существующие слабые связи.

В частности, глава 3 посвящена выработке критериев, по которым можно судить об эффективности метода на примере двух однонаправленно связанных систем, в зависимости от спектральных и корреляционных свойств наблюдаемых сигналов, а также от величины старшего показателя Ляпунова.

Глава 4 посвящена изучению роли шумов и помех измерений на результаты метода с использованием разработанных критериев, а также содержит результаты обобщения предложенных подходов на случай более 2 осцилляторов, в том числе систем с запаздыванием, рассмотренных в 1 главе.

Глава 5 рассматривает вопрос о возможности детектирования изменений в связях в ансамблях 2-4 осцилляторов во времени, для чего разработанные модели и методы применяются в скользящем временном окне. Таким образом, исследуется возможность детектирования причин изменения динамики в сетях, различения случаев, когда изменения вызваны изменениями в собственной динамике отдельных узлов, а когда — эволюцией связей. Также в главе 5 рассматривается вопрос о работоспособности подхода в режимах, близких к фазовой синхронизации между элементами ансамбля.

**Глава 6** содержит примеры приложений предложенной методики к сигналам биологической природы — сигналам мозга людей и крыс. В частности, в ней с помощью развитых в предыдущих главах подходов анализируются локальные электрические потенциалы крыс — моделей

эпилепсии во временном окне и показывается, что с использованием предложенных в работе модификаций моделей и критериев оказывается возможно диагностировать изменения в связанности, предваряющие развитие патологической активности, которые не были выявлены другими подходами.

**Достоверность результатов** обусловлена тем, что они получены на основе общетеоретического базиса радиофизики и нелинейной динамики и сопровождаются оценкой значимости с использованием хорошо зарекомендовавших себя статистических критериев. Все расчёты, проведённые в рамках работы, согласуются с известными в литературе результатами, в том числе и количественно, когда такое сравнение возможно.

**К диссертации имеются следующие замечания:**

- Важная задача, решавшаяся в диссертации, – реконструкция связи между объектами. Были рассмотрены различные подходы к этой задаче. Так в главе 4 рассмотрена задача о реконструкции системы связей 3-х осцилляторов с запаздыванием (систем Икеды). Точно такие же системы рассмотрены в главе 1, но там для них предлагается специфический способ реконструкции. Аналогичная ситуация с реконструкцией связанных обобщённых осцилляторов Ван дер Поля в главе 2 и применении к цепочкам таких осцилляторов (5.1), которые, видимо, могут быть сведены к виду (2.29), причинности по Грейнджеру. К сожалению, эти различные подходы в диссертации никак не сопоставляются.
- В главе 3 всё тестирование проводится на связанных системах 3-го порядка (модели генераторов Дмитриева-Кислова с 1,5 степенями свободы, Анищенко-Астахова, Кияшко-Пиковского-Рабиновича, системы Рёсслера и Лоренца). Но при этом не ясно, как повлияет увеличение размерности системы и связанное с этим увеличение размерности аттрактора на результаты метода. Например, можно было бы взять связанные генераторы Дмитриева-Кислова с 2,5 степенями свободы. Следует отметить, что вопрос о влиянии показателя Ляпунова на работоспособность

предложенных критериев (3.15-3.16) и сформированных на основе их применения рекомендаций на стр. 184-185 рассмотрен, а о влиянии размерности — нет. Между тем, размерность аттрактора должна явно коррелировать с силой связи (при увеличении силы связи и следующей за этим синхронизации аттрактор ведомой системы может упроститься). По идее, размерность аттрактора должна влиять на размерности используемых моделей  $D_s$  и  $D_a$ . Однако, этот вопрос не освещён.

- В главе 6 для разметки эпилептических приступов используются прогностические модели с радиальными базисными функциями, а при расчёте причинности по Грейнджеру в главах 3-6 — только с полиномиальными, линейными и кусочно-линейными. Не ясно, чем обусловлен такой выбор. Если автор владеет методикой построения моделей с радиальными базисными функциями, почему эти модели наряду с другими не использовались для оценки связанности? И почему, с другой стороны, нельзя было ограничиться моделями с полиномиальными функциями для автоматической разметки приступов?

Сделанные замечания не являются принципиальными и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

### **Заключение**

Диссертация И.В. Сыроева представляет собой законченное крупное научное исследование в области нелинейной динамики и её приложений. В рамках работы внесён существенный вклад в решение ряда актуальных задач теоретической радиофизики, в том числе в задачу выявления взаимодействия между объектами-источниками в ансамбле по их сигналам и в задачу восстановления уравнений источников колебаний по скалярным и векторным реализациям.

Диссертация написана ясным языком, снабжена значительным количеством рисунков и оформлена в соответствии с установленными правилами ВАК. Основные результаты изложены в 24 статьях в научных

рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, в том числе в 16 статьях, индексируемых международными базами данных WoS и Scopus, а также доложены на различных всероссийских и международных конференциях и семинарах. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Ильи Вячеславовича Сысоева соответствует всем требованиям ВАК РФ, включая п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (постановление Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 в редакции от 21.04.2016), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а её автор заслуживает присвоения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 — Радиофизика (физико-математические науки).

### **Официальный оппонент**

Доктор физико-математических наук,  
главный научный сотрудник  
лаборатории нелинейной динамики и теоретической биофизики  
ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН  
Адрес: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53  
Тел. (499)132-69-77  
E-mail: apol@lpi.ru

Полежаев Андрей Александрович  
02.04. 2019

Подпись Полежаева А.А. заверяю:

Учёный секретарь ФИАИ  
канд. физ.-мат. наук



Колобов Андрей Владимирович