

АНО ВО «Университет Иннополис»  
420500, г. Иннополис, ул. Университетская, д.1  
university@innopolis.ru; university.innopolis.ru  
ОКПО 26762138; ОГРН 1121600006142;  
ИНН/КПП 1655258235/161501001  
+7 (843) 203-92-53

Председателю Диссертационного  
совета Д 212.243.01 на базе ФГБОУ ВО  
«Саратовский национальный  
исследовательский государственный  
университет имени Н.Г.  
Чернышевского»,  
д.ф.-м.н., профессору Аникину В.М.

20.11.2020 Исх. 2715-ИсХ

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Куркина Семена Андреевича

на диссертацию Ишбулатова Юрия Михайловича «Нелинейная динамика контуров автономного контроля кровообращения: анализ временных рядов, радиофизический эксперимент, реконструкция уравнений», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.03 – «Радиофизика» и 03.01.02 – «Биофизика».

Система кровообращения человека является примером автоколебательной системы биологической природы, изучение которой важно, в частности, для борьбы с социально значимыми заболеваниями. В настоящее время остаются значительные пробелы в понимании нелинейных процессов, происходящих в данной системе, в том числе в контурах автономного контроля кровообращения. Экспериментальное изучение данных вопросов осложнено несовершенством современной измерительной техники, ограниченными возможностями проведения активных экспериментов, существенным разбросом результатов анализа экспериментальных данных и сложностью подбора параметров методов нелинейного анализа.

Автор диссертационного исследования изучал особенности нелинейной динамики контуров автономного контроля кровообращения на базе анализа математической модели системы кровообращения, предложенной из радиофизических соображений. Часть диссертационного исследования посвящена использованию модели для выявления границ применимости, сопоставления и подбора параметров методов нелинейного анализа, которые перспективны для изучения реальной системы.

Таким образом в диссертационной работе решаются следующие актуальные задачи радиофизики и биофизики: развитие построенных из радиофизических и биофизических соображений математических моделей, позволяющих объяснять динамику контуров автономного контроля кровообращения; исследование сложной нелинейной (в том числе, хаотической) динамики таких моделей на основе использования методов радиофизики и теории колебаний, в том числе, при

изменении управляющих параметров; использование модели для апробации и уточнения параметров методов диагностики фазовой синхронизации и направленных связей; решение задачи реконструкции параметров элементов такой колебательной системы по временным рядам.

Диссертационная работа Ишбулатова Ю.М. состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации – 116 страниц, включая 4 таблицы, 22 иллюстрации и список литературы из 93 наименований.

**Во введении** обоснована актуальность проводимых в работе исследований, их научная новизна и практическая значимость, их достоверность и личный вклад соискателя, сформулированы цель и задачи диссертации, кратко изложено содержание работы, основные положения и результаты, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации результатов.

**В первой главе** подходы радиофизики и нелинейной динамики используются для фундаментального анализа причин нерегулярности сердечного ритма, при исследовании временных реализаций предложенной математической модели кровообращения.

По временному ряду последовательности интервалов между сердечными сокращениями модели рассчитывались старший показатель Ляпунова и фрактальная размерность, в том числе, без воздействия на систему шумов, при отключении контуров автономной регуляции и при регулярном дыхании.

На основе результатов расчета мер сложности были получены важные аргументы в пользу гипотезы о важности хаотической динамики контуров автономной регуляции сердечно-сосудистой системы и шумов, происходящих из центральной нервной системы, в генерации нерегулярности сердечного ритма.

**Во второй главе** с помощью разработанной модели изучался известный и широко применяемый в экспериментальных исследованиях тест с пассивным переходом испытуемого из положения лежа в положение стоя.

Расчет статистических индексов, оценка спектральных свойств сигналов и анализ степени активации автономной регуляции показали соответствие модели и экспериментальных результатов.

Разработанная модель позволила исследовать динамику сигналов, которые недоступны для экспериментальной регистрации. В частности, выявлено, что при возрастании среднего уровня активности контура автономной регуляции ритма сердца, активность контура регуляции тонуса сосудов снижается. Показано увеличение амплитуды автоколебаний на частоте 0.1 Гц обоих контуров в ходе теста.

Выявленное увеличение амплитуды автоколебаний регуляторных контуров позволило объяснить наблюдающийся в эксперименте и при моделировании эффект увеличения индекса синхронизации между контурами автономной регуляции.

Во второй главе модель кровообращения также применялась для исследования границ применимости и апробации методов нелинейной динамики.

На примере анализа сигналов предложенной модели сопоставлялись возможности индекса суммарного процента фазовой синхронизации и подходов, основанных на кросс-рекуррентном анализе, по диагностике силы взаимодействия между контурами автономного контроля. Модель исследовалась в нескольких колебательных режимах, в которых последовательно уменьшалась сила взаимодействия контуров автономного контроля. Индекс суммарного процента фазовой синхронизации позволял диагностировать снижение силы взаимодействия контуров автономного контроля в отличие от индексов, основанных на кросс-рекуррентном анализе.

На примере анализа сигналов предложенной модели исследовалась зависимость смещения и разброса оценки величины направленной связи между контурами автономного контроля модели, рассчитываемой методом моделирования фазовой динамики, от длительности анализируемого участка временной реализации.

В исследованиях, выполненных на более простых системах, было установлено, что для получения несмещенной оценки достаточно 60 характерных периодов. Однако при исследовании сигналов сложной модели, более приближенной к объектам реального мира, было показано, что при длительностях временных реализаций менее 120 характерных периодов оценки оказываются смещенными, а при длительностях 120 характерных периодов и более – становятся несмещенными, причем стандартное отклонение оценки этих коэффициентов уменьшается с ростом длины рассматриваемой реализации.

**В третьей главе** сопоставлялись методы реконструкции по временным рядам параметров одного из контуров рассматриваемой в главах 1 и 2 системы, который может быть описан в виде дифференциального уравнения первого порядка с запаздыванием. Модель контура принадлежит к классу генераторов с запаздывающей обратной связью (ГЗОС). Подобные системы с запаздыванием описывают оптические, биофизические и другие системы. Также был исследован гибридный хаотический ГЗОС первого порядка, реализованный в виде радиофизической установки.

В главе были сопоставлены известные методы реконструкции подобных ГЗОС первого порядка, в том числе метод, основанный на использовании вспомогательной системы с синхронным откликом.

Методы сопоставлялись на примере анализа временных реализаций модельного периодического ГЗОС первого порядка в присутствии измерительных и динамических шумов различной интенсивности. Метод считался работоспособным, если погрешность оценки параметров не превышала 1% при реконструкции 100 временных рядов системы при разных реализациях шумов

(интенсивность измерительных шумов приводится относительно стандартного отклонения незашумленной временной реализации).

Было установлено, что метод, основанный на использовании вспомогательной системы с синхронным откликом, применим в наиболее широком диапазоне интенсивностей шумов. Полученные результаты также указывают на применимость метода к коротким временным реализациям.

**В заключении** обобщаются результаты выполненной работы.

**Автореферат** полностью отражает основное содержание диссертации.

**Обоснованность и достоверность** результатов, полученных диссертантом при построении развиваемых моделей, обусловлена записью их уравнений на основе физических соображений с использованием известных опубликованных результатов; тем, что внесенные в модель модификации не противоречат известным из литературы выводам о структуре и характере динамики системы кровообращения; соответствием результатов анализа временных реализаций моделей и экспериментальных данных друг другу и опубликованным другими авторами экспериментальным результатам; статистическим анализом ансамблей реализаций; использованием известных методов реконструкции параметров модельных уравнений генераторов с запаздывающей обратной связью и зарекомендовавших себя при исследованиях экспериментальных данных и эталонных колебательных систем подходов к обработке и анализу сигналов.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Показано, что отключение контуров автономной регуляции или шумов центрального происхождения в предложенной модели оказывает статистически значимое влияние на значения мер сложности, рассчитанных по последовательности интервалов между сокращениями сердца, что свидетельствует в пользу гипотезы о важности комбинации этих факторов для возникновения нерегулярности сердечного ритма.

2. Показано, что изменение управляющего параметра предложенной модели, имеющего физический смысл гидростатического давления крови, при моделировании изменения положения тела человека из горизонтального в вертикальное приводит к увеличению амплитуды автоколебаний контуров регуляции кровообращения, причем такая динамика контуров объясняет наблюдающееся в экспериментах увеличение относительного времени синхронизации между этими контурами.

3. Проведенное сопоставление методов реконструкции модельных уравнений генераторов с запаздыванием первого порядка продемонстрировало, что подход, основанный на использовании системы с синхронным откликом, позволяет восстанавливать по коротким периодическим временным рядам длительностью от 4 характерных периодов колебаний, постоянную времени инерционного элемента и параметры нелинейной передаточной характеристики, в том числе, в присутствии стохастических воздействий на динамику системы и/или измерительного шума.

Научная новизна полученных результатов также подтверждается списком работ, опубликованных по теме диссертации в ведущих российских и международных журналах. По результатам опубликовано 16 печатных работ, включая 11 статей в реферируемых журналах, рекомендованных ВАК (все индексируются в системах WoS и Scopus). Получено 5 свидетельств о регистрации программ, реализующих модели и методы, развиваемые в диссертационной работе.

Рассмотренные в диссертации задачи, полученные результаты и сделанные на их основе выводы полностью соответствуют специальностям 01.04.03 – «Радиофизика» (п.1. Разработка физических основ генерации, усиления и преобразования колебаний и волн различной природы, а также автоволн в неравновесных химических и биологических системах; п.4. Создание новых методов анализа и статистической обработки сигналов в условиях помех. Исследование нелинейной динамики, пространственно-временного хаоса и самоорганизации в неравновесных биологических системах) и 03.01.02 – «Биофизика» (применение физических методов и математического аппарата для изучения фундаментальных физических взаимодействий, лежащих в основе процессов жизнедеятельности).

Научная новизна и практическая значимость полученных диссертантом результатов исследований не вызывают сомнений. Однако **работа не лишена отдельных недостатков и неточностей:**

1. В главе 2 диссертант формулирует гипотезу о динамике реальной живой системы по результатам моделирования, однако, сопоставление модельных и экспериментальных данных говорит об отсутствии количественного соответствия, что особенно заметно для индексов “LF” и “S” (формулы 2.5 и 2.9). Диссертанту следовало бы отметить данное количественное несоответствие и обосновать его допустимость.
2. В главе 1 и главе 2 диссертации для диагностики синхронизации между контурами автономной регуляции, а также диагностики степени их связанности используется расчет суммарного процента фазовой синхронизации  $S$  (формула 2.9). Требуется обосновать выбор данной методики по сравнению с другими более распространенными методами, например, расчетом синхрограмм или коэффициента фазовой синхронизации.
3. Ряд выводов получен диссертантом по результатам анализа модельных сигналов электрокардиограмм, которые имеют пилообразную форму, далекую от характерной формы реального ЭКГ сигнала. В то же самое время известен ряд математических моделей, позволяющих воспроизводить характерную форму сигнала электрокардиограммы. Уместно было бы обосновать в тексте диссертации допустимость вышеуказанного упрощения.

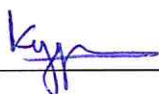
4. В главе 3 приводится неточное название одного из методов реконструкции: “метод, основанный на использовании вспомогательной системы с синхронным откликом”. Слово “вспомогательной” лишнее.
5. В главе 3 исследуются границы применимости методов реконструкции в присутствии “динамических” шумов различной интенсивности. В данном контексте правильнее говорить: “шумов, добавленных в динамику системы”.
6. В тексте диссертации присутствуют опечатки и мелкие неточности.

Однако высказанные замечания не снижают общего положительного впечатления от работы. Таким образом, по степени обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертационной работе, их достоверности и новизне, актуальности выбранной темы исследования, практической значимости полученных результатов диссертация Ишбулатова Юрия Михайловича удовлетворяет всем требованиям пп. 9-11,13,14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а автор работы заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.03 – «Радиофизика» и 03.01.02 – «Биофизика».

Официальный оппонент

Профессор центра технологий компонентов робототехники и мехатроники лаборатории нейронауки и когнитивных технологий АНО ВО "Университет Иннополис",

доктор физико-математических наук (05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ)



Куркин Семен Андреевич

«19» 11 2020 г.

Автономная некоммерческая организация высшего образования "Университет Иннополис"

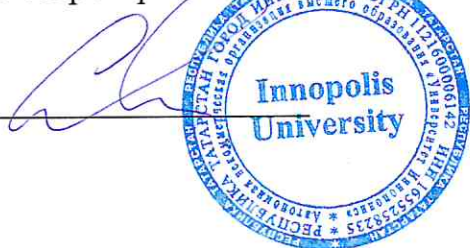
Адрес: 420500, г. Иннополис, ул. Университетская, д.1

Телефон +7 (843) 203-92-53

E-mail: university@innopolis.ru

Подпись д.ф.-м.н. Куркина Семена Андреевича удостоверяю.

Ученый секретарь Ученого совета АНО ВО "Университет Иннополис",



Масягин Сергей Владимирович