

На правах рукописи



БОРОВКОВА Екатерина Игоревна

**РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ
ИНТЕРВАЛОВ СИНХРОНИЗАЦИИ ПО НЕСТАЦИОНАРНЫМ ВРЕМЕННЫМ
РЯДАМ**

01.04.03 Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

Саратов 2018

Работа выполнена на кафедре динамического моделирования и биомедицинской инженерии Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского и в Саратовском филиале Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Научный руководитель: **Карavaев Анатолий Сергеевич**
кандидат физико–математических наук,
ФГБОУ ВО «Саратовский национальный
исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского», доцент

Официальные оппоненты: **Матросов Валерий Владимирович**
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Нижегородский государственный университет
имени Н.И. Лобачевского», декан

Максименко Владимир Александрович
кандидат физико-математических наук,
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный
технический университет имени Гагарина Ю.А.»,
ассистент

Ведущая организация **ФГБОУ ВО «Владимирский государственный
университет имени Александра Григорьевича и
Николая Григорьевича Столетовых»**

Защита диссертации состоится ___ июня 2018 года в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 при Саратовском государственном университете имени Н.Г. Чернышевского по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, III учебный корпус, 34 аудитория.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

Автореферат разослан « ___ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико–математических
наук



Аникин Валерий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Явление синхронизации, впервые описанное в 1665 году Христианом Гюйгенсом как согласованность хода взаимодействующих часов, оказалась фундаментальным явлением, широко представленным в нелинейных колебательных системах различной природы. Со временем содержание этого термина переосмысливалось и в настоящее время под ним понимается подстройка фаз и частот колебаний автоколебательных (в том числе хаотических) систем при воздействии на них внешних сигналов, либо в результате их взаимодействия, а также полная синхронизация хаоса¹. В этом смысле он используется и в диссертационной работе.

Исключительно велика и практическая значимость явления синхронизации - оно успешно используется для организации устойчивого взаимодействия элементов и движений в многокомпонентных устройствах, стабилизации изображений, диагностики связей в ансамблях, а ее уменьшение рассматривают в качестве предвестника разрушения структур^{2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14}.

¹ А.С. Пиковский, М.Г. Розенблум, Ю. Куртс Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. Москва: Техносфера, 2003. 496 с.

² V.V. Astakhov, V.S. Anishchenko, A.V. Shabunin, T. Kapitaniak Synchronization of chaotic oscillators by periodic parametric perturbations // Physica D: Nonlinear Phenomena. 1997. Т. 109. N. 12. С. 11-16.

³ J.P. Ramirez, L.A. Olvera, H. Nijmeijer, J. Alvarez The sympathy of two pendulum clocks: beyond Huygens' observations // Nature Scientific Reports. 2016. V. 6. P. 23580.

⁴ J.A. Rial, J. Oh, E. Reischmann Synchronization of the climate system to eccentricity forcing and the 100,000-year problem // Nature Geoscience. 2013. V. 6. P. 289-293.

⁵ H. Yang, B.Han, J. Shin, D. Hou, H. Chung, I.H. Baek, Y.U. Jeong, J. Kim 10-fs-level synchronization of photocathode laser with RF-oscillator for ultrafast electron and X-ray sources // Scientific Reports. 2017. V. 7. P. 39966.

⁶ А.Б. Каток, Б. Хасселблат Введение в современную теорию динамических систем. Москва: Факториал, 1999. 768 с.

⁷ А.А. Андронов, А.А. Витт, С.Э. Хайкин Теория колебаний. Москва: Наука, 1981. -568 с.

⁸ Ю.И. Неймарк, П.С. Ланда Стохастические и хаотические колебания. Москва: Либроком, 2009. 424 с.

⁹ Ланда П.С. Нелинейные колебания и волны. Москва: Либроком, 2010. -551 с.

¹⁰ В.В. Матросов, В.Д. Шалфеев Нелинейная динамика систем фазовой синхронизации. Н.Новгород: Изд. ННГУ, 2013. 366 с.

¹¹ М.И. Рабинович, Д.И. Трубецков Введение в теорию колебаний и волн. Саратов: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2000. 560 с.

¹² В.С. Афраймович, В.И. Некоркин, Г.В.Осипов, В.Д. Шалфеев Устойчивость, структуры и хаос в нелинейных сетях синхронизации. Горький: ИНФ АН, 1989. 245 с.

¹³ Emelianova Y.P., Emelyanov V.V., Ryskin N.M. Synchronization of two coupled multimode oscillators with time-delayed feedback // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2014. Т. 19. N. 10. С. 3778-3791.

¹⁴ V. S. Anishenko, T. E. Vadivasova, D. E. Postnov, M. A. Safonova Synchronization of chaos // International Journal of Bifurcation and Chaos. 1992. V. 2. P. 633.

В диссертационной работе решаются задачи определения границ интервалов синхронизации по экспериментальным временным реализациям, что является типичной задачей при изучении объектов и явлений реального мира.

Для решения задачи определения границ интервалов синхронизации по временным реализациям колебаний был предложен целый ряд методов, основанных на анализе мгновенных фаз^{15,16}, использовании методов статистики и спектральном анализе^{17,18}, теоретико-информационных подходах¹⁹, анализе фазовых пространств^{20,21}.

Большинство известных методов определения границ интервалов синхронизации ориентированы на использование длинных (сотни характерных периодов) стационарных временных реализаций. Однако, для многих колебательных систем реального мира характерны быстрые изменения параметров, в частности, коэффициентов связи, которые приводят к смене синхронного и несинхронного поведения взаимодействующих систем за время наблюдения и во многих областях науки и техники возникают задачи, требующие анализа характера взаимодействия и количественной оценки степени синхронизации систем по нестационарным данным, для которых характерно чередование интервалов синхронизации и несинхронного поведения^{22,23,24}.

Представленная диссертационная работа ориентирована на анализ таких нестационарных данных. Она включает решение нескольких конкретных задач в данном направлении. Решается задача определения границ интервалов синхронизации по экспериментальным временным рядам

¹⁵ F. Mormann, K. Lehnertz, P. David, C.E. Elger Mean phase coherence as a measure for phase synchronization and its application to the EEG of epilepsy patients // *Journal of Physics D*. 2000. V. 144. P. 358.

¹⁶ P. Tass, M.G. Rosenblum, J. Weule, J. Kurths, A.S. Pikovskii, J. Volkmann, A. Schnitzler, H.J. Freund. Detection of n:m phase locking from noisy data: application to magnetoencephalography // *Physical Review Letters*. 1998. V. 81. N. 15. P. 3291-3294.

¹⁷ С. А. Айвазян Статистическое исследование зависимостей. Москва: Металлургия, 1968. 227с.

¹⁸ J.R. Rosenberg, A.M. Amjad, P. Breeze, D.R. Brillinger, and D.M. Halliday The Fourier approach to the identification of functional coupling between neuronal spike trains. // *Progress in Biophysics and Molecular Biology*. 1989. V. 53. P. 1-31.

¹⁹ K. Pawelzik and H.G. Schuster. Generalized dimensions and entropies from a measured time series. // *Physical Review A*. 1987. V. 35. P. 481-484.

²⁰ R. Quiñero, J. Arnhold, P. Grassberger Learning driver-response relationships from synchronization patterns. // *Physical Review E*. 2000. V. 61. N. 5. P. 5142-5148.

²¹ N. Rulkov, M. Sushchik, L. Tsimring Generalized synchronization of chaos in directionally coupled chaotic systems. // *Physical Review E*. 1995. V. 51. N. 2. P. 980-994.

²² B.P. Bezruchko, D.A. Smirnov Extracting Knowledge From Time Series: (An Introduction to Nonlinear Empirical Modeling). Springer, 2010. 410 p.

²³ J.A. Rial, J. Oh, E. Reischmann Synchronization of the climate system to eccentricity forcing and the 100,000-year problem // *Nature Geoscience*. 2013. V. 6. P. 289-293.

²⁴ C. Schäfer, M.G. Rosenblum, J. Jürgen Kurths, A. Hans-Henning Heartbeat synchronized with ventilation // *Nature*. 1998. V. 392. N. 6673. P. 239.

неавтономных генераторов, при воздействии на них сигналом, частота которого изменяется во времени. Разработан метод определения границ интервалов фазовой синхронизации взаимодействующих автогенераторов по нестационарным данным. Проведено сопоставление возможностей предложенного метода с несколькими известными подходами. Апробация известных и предложенного метода, сопоставление их возможностей и границ применимости проведены в работе при анализе временных реализаций объектов различной природы.

В работе анализировались временные реализации эталонных нелинейных осцилляторов, полученные в ходе численного интегрирования их модельных уравнений на компьютере. Такие объекты удобны для тестирования метода, так как все их свойства и параметры полностью контролируются исследователем. Известные и развиваемые методы определения границ интервалов синхронизации также апробировались при анализе временных реализаций радиофизических автогенераторов и других натуральных объектов. Исследование синхронизации таких объектов позволяет оценить возможности методов анализа в условиях наличия шумов, искажений и нестационарности, характерных для экспериментальных данных.

Выбор задач, рассматриваемых в диссертационной работе, ориентированных на развитие и применение в фундаментальных и прикладных исследованиях методов анализа синхронизации взаимодействующих нелинейных объектов различной физической природы по их нестационарным экспериментальным временным рядам, свидетельствует о соответствии тематики диссертационной работы формуле специальности 01.04.03 - радиофизика. Диссертация соответствует пунктам 2 и 4 паспорта данной специальности.

Разработка чувствительного метода определения границ интервалов синхронизации по нестационарным экспериментальным данным, а также выявление возможностей, ограничений и границ применимости предложенного и известных методов при анализе синхронизации практически важных натуральных систем определяет актуальность исследования.

Цель диссертационной работы: Разработка метода определения границ интервалов синхронизации, сопоставление его возможностей с известными методами при анализе нелинейных колебательных систем, а также апробация методов диагностики синхронизации при анализе нестационарных экспериментальных временных реализаций систем различной природы.

Для достижения цели решались следующие **основные задачи**:

1. Анализ результатов применения комплекса известных методов определения границ интервалов синхронизации по временным рядам при анализе реализаций численной модели нелинейного неавтономного генератора и при моделировании эффекта просачивания.

2. Определение границ интервалов синхронизации неавтономного радиофизического генератора с запаздывающей обратной связью и других натуральных объектов с помощью комплекса известных методов.
3. Разработка метода определения границ интервалов фазовой синхронизации, позволяющего выявлять границы интервалов фазовой синхронизации при анализе нестационарных временных реализаций взаимодействующих автогенераторов, для которых характерно чередование интервалов синхронизации и несинхронного поведения.
4. Оценка работоспособности предложенного метода определения границ интервалов синхронизации при анализе нестационарных временных реализаций неавтономного генератора в численном эксперименте, в ходе которого осуществляется модуляция коэффициента связи, а также временных реализаций, полученных в натуральных экспериментах.
5. Сопоставление предложенного в диссертации метода определения границ интервалов синхронизации с известными методами при анализе специальным образом сформированных тестовых временных реализаций, воспроизводящих статистические свойства экспериментальных данных.

На защиту выносятся следующие положения

1. Использование комплекса методов определения границ интервалов синхронизации позволило выявить наличие синхронизации контуров регуляции частоты сердечных сокращений и среднего артериального давления внешним сигналом дыхания, частота которого нарастает около собственной частоты колебаний контуров, позволяя наблюдать интервалы синхронизации длительностью более 100 характерных периодов собственных колебаний.
2. Разработанный метод, основанный на кусочно-линейной аппроксимации мгновенной разности фаз в скользящем окне и оценке углового коэффициента наклона аппроксимирующей прямой, позволяет определять границы интервалов фазовой синхронизации по нестационарным временным реализациям взаимодействующих автоколебательных систем, для которых характерно чередование интервалов синхронизации длительностью более двух характерных периодов и несинхронного поведения.
3. Анализ тестовых разностей мгновенных фаз, приготовленных с помощью специализированного метода, позволяющего воспроизводить статистические свойства нестационарных экспериментальных реализаций, содержащих нерегулярно чередующиеся интервалы фазовой синхронизации и несинхронного поведения, позволил сделать вывод о более высокой чувствительности разработанного метода, основанного на кусочно-линейной аппроксимации мгновенной разности фаз в скользящем окне и оценке углового коэффициента наклона аппроксимирующей прямой по сравнению с известными методами, основанными на оценке коэффициента фазовой когерентности и коэффициента дисперсии фазы.

Научная новизна результатов работы состоит в следующем

1. Проведено сопоставление ряда известных методов определения границ интервалов синхронизации при анализе временных реализаций неавтономного нелинейного осциллятора, находящегося под воздействием линейно-частотно-модулированным гармоническим сигналом, а также временных реализаций автономного осциллятора, к которым линейно подмешивался такой линейно-частотно-модулированный сигнал.
2. С помощью комплекса радиофизических методов определения границ интервалов захвата фаз и частот на примере анализа временных реализаций, полученных в натуральных экспериментах, диагностированы и количественно сопоставлены границы синхронизации нескольких авторегенераторов находящихся под воздействием общего линейно-частотно-модулированного сигнала для исследования автоколебательного характера их динамики.
3. Разработан метод определения границ интервалов фазовой синхронизации, основанный на кусочно-линейной аппроксимации разности мгновенных фаз в скользящем окне и контроле угла наклона аппроксимирующей прямой, позволяющий определить границы интервалов синхронизации по нестационарным сигналам взаимодействующих автогенераторов, для которых характерна динамика с чередованием интервалов синхронизации и несинхронного поведения.
4. Предложена методика формирования искусственных нестационарных временных реализаций мгновенных фаз взаимодействующих автогенераторов различной природы, включающих чередующиеся интервалы с синхронным и несинхронным поведением мгновенных фаз, воспроизводящих статистические свойства экспериментальных сигналов.
5. Проведено сопоставление предложенного метода определения границ интервалов синхронизации, основанного на кусочно-линейной аппроксимации разности мгновенных фаз в скользящем окне с контролем угла наклона аппроксимирующей прямой, с известными методами, основанными на оценке коэффициента фазовой когерентности и коэффициента диффузии фазы.

Научное и практическое значение результатов работы.

Результаты развития новых и апробации известных методов определения границ интервалов синхронизации автоколебательных систем при анализе нестационарных временных реализаций, для которых характерно чередование интервалов фазовой синхронизации и несинхронного поведения, представляют фундаментальный интерес с точки зрения радиофизики, позволяя развить исследовательский инструментарий методов анализа сигналов систем различной природы по временным рядам. Практическое значение работы подчеркивается тем, что результаты работы реализованы в виде комплекса компьютерных программ и в настоящее время используются в ходе исследований на базе Саратовского отделения ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, СГУ им. Н.Г. Чернышевского, СГТУ им. Ю.А. Гагарина, ООО "Наука и инновации" и др.

Достоверность научных выводов обусловлена статистическим анализом результатов обработки экспериментальных данных, тестированием разработанных методов определения границ интервалов фазовой синхронизации на эталонных математических и радиофизических моделях, тестовых данных, совпадением ряда результатов и выводов с результатами и выводами других авторов, полученных с помощью других методов.

Личный вклад соискателя. Постановка цели и задач диссертационной работы, проведение радиофизического эксперимента, интерпретация результатов осуществлялись совместно с научным руководителем. Обзор литературы, разработка развиваемых методов определения границ интервалов фазовой синхронизации, анализ экспериментальных данных, создание компьютерных программ для численного моделирования и реализации развиваемых подходов, проведение численных экспериментов и сравнительный анализ известных ранее и вновь предложенных методов выполнены непосредственно автором.

Апробация работы и публикации.

Результаты, полученные в диссертационной работе, опубликованы в 18 печатных работах: 6 работ – в реферируемых журналах, индексируемых в международных базах Web of Science и Scopus, 3 работы в списках русскоязычных журналов, рекомендованных ВАК для публикации материалов диссертационных работ. Результаты работ были представлены на 9 международных и всероссийских научных конференциях. Получены 9 свидетельств об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Основные результаты диссертации были представлены на научных семинарах в СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, на кафедре динамического моделирования и биомедицинской инженерии ФНиБМТ СГУ им. Н.Г. Чернышевского и на всероссийских школах-конференциях: «Нелинейные волны», г. Н.Новгород, 2016; «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», г. Саратов, 2008, 2012, 2014–2016; «Нелинейные колебания механических систем», г. Н. Новгород, 2012; «Волновые явления в неоднородных средах», г. Звенигород, 2010; «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине», г. Саратов, 2007, 2012, 2016.

Проведенные исследования были поддержаны Российским научным фондом (14-12-00291, 17-12-01008) Российским фондом фундаментальных исследований (16-32-00326, 13-02-00227, 15-02-03061, 14-08-31145), Фондом некоммерческих программ “Династия”, грантами Президента РФ (МК-4435.2012.8, НШ-1726.2014.2) и стипендией Президента РФ (СП-3975.2013.4), Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно–технической сфере, программами РАН и Министерства образования и науки РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации 127 страниц,

включая 24 страницы иллюстраций и 7 страниц списка литературы из 67 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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 решаются задачи определения границ интервалов захвата фаз и частот по нестационарным временным реализациям неавтономных автогенераторов различной природы, находящихся под воздействием линейно-частотно-модулированного сигнала.

Исследование динамики сложных натуральных систем по экспериментальным данным является типичной задачей при изучении объектов и явлений реального мира. В случае если знания об объекте исследования ограничены и доступны только отдельные временные реализации, решение такой задачи является сложным и нетривиальным. В таких условиях постановка активного эксперимента с осуществлением воздействия на объект известным внешним сигналом может являться единственным способом получения объективной информации¹.

В диссертационной работе, набор радиофизических методов определения границ интервалов захвата частот и фаз неавтономных генераторов использовался для исследования особенностей динамики элементов сердечно-сосудистой системы, обеспечивающих подстройку частоты сердечных сокращений и среднего артериального давления в активных экспериментах. Использовался ряд известных методов определения границ интервалов синхронизации колебаний, включая: построение диаграммы частотного захвата²⁵, расчет синхрограммы²⁶, оценку коэффициента фазовой когерентности¹⁵, специализированный метод, основанный на использовании вейвлет-преобразования с изменением масштабного коэффициента вейвлета в соответствии с известным законом изменения частоты внешнего воздействия^{27,28}. Возможности используемых методов по анализу сигналов сложных систем предварительно апробировались при обработке временных рядов эталонных осцилляторов и экспериментальных реализаций хаотического радиофизического генератора.

²⁵ И.И. Блехман Синхронизация в природе и технике. Москва: Наука, 1981. 352 с.

²⁶ C. Schafer, M.G. Rosenblum, H.H. Abel, J. Kurths Synchronization in the human cardiorespiratory system // Physical Review E. 1999. V. 60. P. 857-870.

²⁷ A.E. Hramov, A.A. Koronovskii, V.I. Ponomarenko, M.D. Prokhorov Detecting synchronization of self-sustained oscillators by external driving with varying frequency // Physical Review E. 2006. V. 73. P. 026208.

²⁸ A.E. Hramov, A.A. Koronovskii, V.I. Ponomarenko, M.D. Prokhorov Detection of synchronization from univariate data using wavelet transform // Physical Review E. 2007. V. 75. P. 056207.

Для изучения возможности различения захвата частот и фаз и типичного для систем реального мира паразитного линейного смешивания сигналов в измерительном канале используемые методы определения границ интервалов синхронизации применялись для анализа временных рядов, полученных в ходе численного интегрирования эталонного неавтономного генератора, находящегося под воздействием линейно-частотно-модулированного гармонического сигнала и при линейном подмешивании линейно-частотно-модулированного сигнала к временным реализациям автономного генератора. Показано, что используемые методы анализа демонстрируют близкие результаты, позволяя корректно диагностировать интервалы захвата частот и фаз, с погрешностью не превышающей 1 характерного периода, и позволяют различить синхронизацию от паразитного эффекта просачивания.

Работоспособность методов при анализе экспериментальных реализаций была продемонстрирована в ходе исследования синхронизации радиофизического неавтономного хаотического генератора с запаздывающей обратной связью, структура которого повторяет структуру анализируемых элементов системы кровообращения, внешним линейно-частотно-модулированным гармоническим сигналом $y(t)$:

$$RC\dot{x}(t) = -x(t) + F(x(t - \tau_0)) + y(t), \quad (1)$$

где $x(t)$ и $x(t - \tau_0)$ - напряжения на входе и выходе линии задержки, соответственно, τ_0 - время запаздывания, R и C - сопротивление и емкость элементов фильтра, F - квадратичная передаточная характеристика нелинейного элемента.

Блок-схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1.

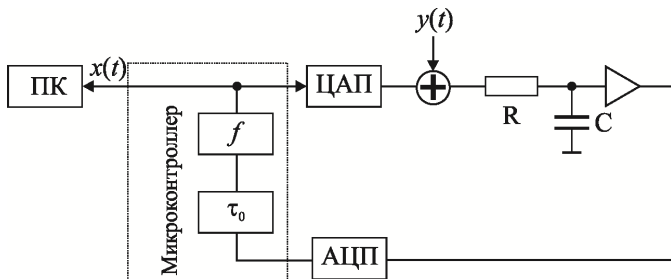


Рис. 1. Блок-схема радиофизической экспериментальной установки: гибридный хаотический генератор с запаздывающей обратной связью с квадратичной нелинейностью под воздействием внешнего линейно-частотно-модулированного сигнала $y(t)$.

Линия задержки и нелинейный элемент генератора с запаздывающей обратной связью реализованы в цифровом виде на базе микроконтроллера, сигнал с выхода нелинейного элемента подавался на вход цифро-аналогового преобразователя, проходил через инерционный элемент, представляющий собой RC-фильтр нижних частот, оцифровывался с помощью встроенного аналого-цифрового преобразователя последовательного приближения и подавался в цифровом виде на вход линии задержки, представляющей собой кольцевой буфер в оперативной памяти микроконтроллера.

Для нескольких значений амплитуд внешнего воздействия показано, что все используемые методы позволяют диагностировать интервалы синхронизации порядка 1:1 автоколебаний генератора внешним сигналом и идентифицировать их границы. разброс оценок границ интервала, полученный с помощью различных методов, не превышает 0.001 с. Пример определения границ интервалов синхронизации генератора с запаздывающей

обратной связью при амплитуде внешнего воздействия 2.0 В представлен на рисунке 2.

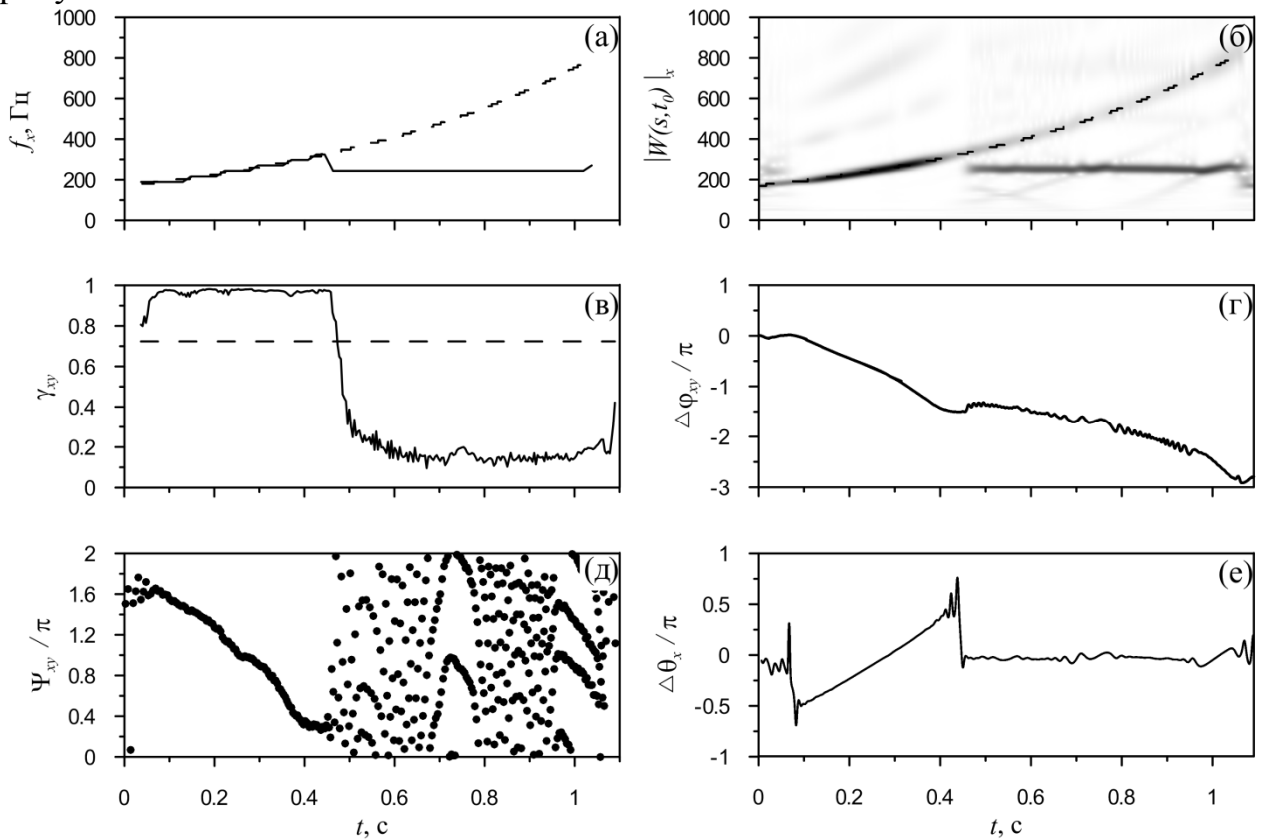


Рис. 2. Результаты определения границ интервалов синхронизации в ходе обработки временных рядов колебаний напряжения на выходе генератора с запаздывающей обратной связью, находящегося под воздействием внешнего сигнала с периодом, линейно уменьшающимся во времени. Амплитуда внешнего воздействия 2.0 В, за время эксперимента частота внешнего сигнала изменяется от 200 Гц до 1000 Гц. (а) диаграмма частотного захвата. Значения основной частоты колебаний генератора с запаздывающей обратной связью, лежащие вблизи мгновенной частоты внешнего сигнала (пунктирная линия), соответствуют синхронному поведению; (б) вейвлет–спектр Морле, пунктир - частота внешнего воздействия; (в) значения коэффициента фазовой когерентности, рассчитанного в скользящих окнах длительностью 10 характерных периодов. Горизонтальная пунктирная линия отмечает полный 95%–й уровень значимости, рассчитанный при проверке нулевой гипотезы о несвязанных системах. Значения, превышающие эту линию, с вероятностью 0.95 указывают на наличие значимой синхронизации; (г) динамика разности фаз на временных масштабах, соответствующих частоте воздействующего сигнала. Участок линейного падения разности фаз на π указывает на фазовую синхронизацию; (д) синхрограмма; (е) динамика приращения фаз на постоянном масштабе, соответствующей собственной частоте автогенератора 220 Гц.

Рисунки 2а,б демонстрируют классическую картину частотного захвата неавтономного автогенератора при изменении частоты внешнего воздействия в интервале частот от 200-1000 Гц (за временной интервал 1,1 с). Диагностика фазовой синхронизации разнородными методами с использованием различных методов определения мгновенных фаз колебаний позволяет идентифицировать интервал синхронизации 0.013-0.045 с (рис. 2в-е). Наиболее удобным для определения границ интервалов синхронизации оказывается метод оценки в окнах коэффициента фазовой когерентности

(рис. 2в), который демонстрирует крутые фронты при входе и выходе из синхронного режима, пересекая критический уровень. В диссертации для количественной оценки длительности интервалов синхронизации использовался этот подход и построение диаграммы частотного захвата, остальные методы использовались для качественного контроля и сопоставления результата, повышая достоверность результатов анализа.

При воздействии на генератор частотно-модулированным воздействием потенциально возможно формирование режимов сложной динамики, искажение границ кловов синхронизации, возникновение мультистабильности с формированием сложной структуры вложенных языков синхронизации. Для исключения влияния этих эффектов в экспериментах при численном и радиофизическом моделировании проводились специальные тесты, включающие изменение частоты в обратном направлении и с другой скоростью. Границы синхронизации определялись в тех же местах.

После апробации и тестирования методов определения границ интервалов синхронизации при анализе реализаций эталонных моделей нелинейной динамики и временных рядов радиофизического генератора был проведен анализ синхронизации контуров сердечно-сосудистой системы, имеющих характерные частоты колебаний около 0.1 Гц и обеспечивающих регуляцию частоты сердечных сокращений и среднего артериального давления в соответствии с текущими потребностями организма. Для этого были проведены активные эксперименты, в которых изучался захват линейно-частотно-модулированным сигналом дыхания (частота вдохов линейно нарастала от 0.05 Гц до 0.25 Гц в течение 25 минут) фаз и частот контуров регуляции частоты сердечных сокращений и среднего артериального давления. Были выявлены длительные интервалы захвата сигналом дыхания частоты и фазы сигналов анализируемых контуров длительностью до 1080 с (более 100 характерных периодов колебаний). Выявленное смещение интервалов синхронизации анализируемых контуров друг относительно друга позволило сделать вывод о том, что анализируемые контуры могут рассматриваться, как взаимодействующие автогенераторы, что является важным результатом, представляющим фундаментальный интерес²⁹.

Во второй главе диссертации предложен метод диагностики фазовой синхронизации, позволяющий выявлять границы интервалов фазовой синхронизации при анализе нестационарных временных реализаций взаимодействующих автогенераторов, для которых характерно чередование интервалов синхронизации и несинхронного поведения. Работоспособность методов иллюстрируется в ходе анализа реализаций эталонных моделей нелинейной динамики и данных натурального эксперимента.

²⁹ R.L. Cooley, N. Montano, C. Cogliati, P. Van de Borne, W. Richenbacher, R. Oren, V.K. Somers Evidence for a Central Origin of the Low-Frequency Oscillation in RR-Interval Variability // Circulation. 1998. V. 98. P. 556-561.

Несмотря на значительное количество известных методов анализа синхронизации систем по временным реализациям оказывается, что большинство из них не подходят для количественной оценки степени синхронизации при анализе нестационарных сигналов для которых характерно чередование интервалов синхронизации и несинхронного поведения, обусловленное перестройкой параметров систем во времени. В диссертационной работе предложен метод определения границ интервалов фазовой синхронизации, основанный на кусочно-линейной аппроксимации мгновенной разности фаз в скользящем окне и оценке углового коэффициента наклона аппроксимирующей прямой. Метод состоит в следующем. В окне, имеющем ширину b , с помощью метода наименьших квадратов проводится линейная аппроксимация зависимости разности мгновенных фаз $\Delta\varphi(t)$ (рис. 3а). В результате для момента времени t_i , соответствующего середине окна, рассчитывается угловой коэффициент наклона аппроксимирующей прямой α_i . Смещая окно на одну точку вдоль временной реализации $\Delta\varphi(t)$, вычисляем угол наклона α_{i+1} для $\Delta\varphi(t)$ в момент времени t_{i+1} (рис. 3б). Областям фазовой синхронизации, на которых зависимость $\Delta\varphi(t)$ представляет собой пологое плато, соответствуют участки с малым значением углового коэффициента наклона α . Участки фазовой синхронизации идентифицируются, если $|\alpha| \leq |a|$, где a пороговое значение коэффициента наклона α , причем длительность такого интервала составляет не менее l .

Для интегральной количественной оценки степени синхронизации систем по нестационарным реализациям использовался интегральный индекс суммарный процент фазовой синхронизации S , представляющий собой сумму длин найденных интервалов синхронизации, отнесенную к длительности всей записи и выраженную в процентах. При расчете S оценивалась статистическая значимость результатов анализа с помощью генерации ансамбля суррогатных данных³⁰. Результаты полагались значимыми при оценке критического значения S с уровнем значимости $p=0.05$.

В численном эксперименте при анализе нестационарных временных реализаций неавтономного генератора при модуляции коэффициента связи в присутствии шума продемонстрирована работоспособность предложенного метода и проведена работа по выбору значений свободных параметров метода: l , a , b , обеспечивающих лучшую чувствительность при определении границ интервалов синхронизации.

Предложенный метод определения границ интервалов синхронизации был апробирован при анализе нестационарных реализаций контуров регуляции частоты сердечных сокращений и среднего артериального давления, полученных в натурном эксперименте. Типичная разность фаз

³⁰J. Theiler, A. Longtin, B. Galdrikian, J. Farmer Testing for nonlinearity in time series: the method of surrogate data // Journal of Physics D. 1992. V. 58. P. 77-94.

исследуемых автогенераторов имеющих собственные частоты колебаний около 0.1 Гц и диагностированные с помощью предложенного метода участки фазовой синхронизации представлены на рисунке 3в. На рисунке видна характерная особенность динамики исследуемых объектов с нерегулярным чередованием интервалов фазовой синхронизации длительностью до десятков характерных периодов и несинхронного поведения. Величина суммарного процента фазовой синхронизации для представленного на рис. 3б примера составила $S=57.4\%$. В ходе проведенных исследований была показана фундаментальная и прикладная значимость такого анализа [Karavaev A.S. et.al. // CHAOS. 2009].

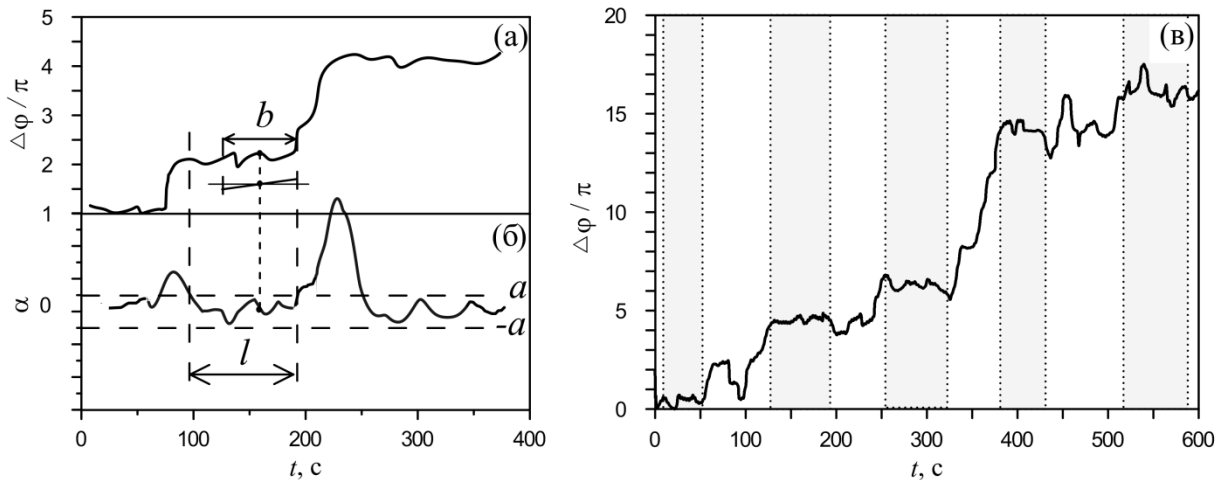


Рис. 3. Иллюстрация метода поиска интервалов синхронизации колебаний по нестационарным временным рядам: (а) линейная аппроксимация зависимости разности мгновенных фаз колебаний $\Delta\varphi(t)$ в скользящем окне; (б) угол наклона аппроксимирующей прямой α ; (в) результаты выявления интервалов фазовой синхронизации на примере анализа зашумленных временных рядов автогенераторов имеющих собственные частоты колебаний около 0.1 Гц. Серыми полосами отмечены выявленные участки фазовой синхронизации.

Третья глава посвящена сопоставлению методов определения границ интервалов фазовой синхронизации при анализе нестационарных временных реализаций взаимодействующих автогенераторов.

Проведенный обзор показал, что среди многообразия известных методов определения границ интервалов синхронизации лишь несколько могут использоваться для определения границ интервалов подстройки фаз взаимодействующих автогенераторов в условиях достаточно быстрого изменения параметров генераторов, приводящего к чередованию интервалов синхронной и несинхронной динамики (когда длительность таких интервалов составляет порядка десятков характерных периодов колебаний). По результатам проведенного обзора сделан вывод о возможности использования для решения поставленной задачи трех методов: предложенного во второй главе диссертационной работы метода, основанного на кусочно-линейной аппроксимации мгновенной разности фаз в скользящем окне, оценке углового коэффициента наклона аппроксимирующей прямой, метода, основанного на оценке коэффициента фазовой когерентности¹⁵, и метода, основанного на оценке коэффициента

диффузии фазы³¹. Сопоставлению возможностей и ограничений этих методов при анализе нестационарных данных посвящена данная глава.

Существенной проблемой при изучении свойств методов определения границ интервалов синхронизации сложных систем по их нестационарным сигналам является невозможность получения объективной информации о границах интервалов подстройки фаз при анализе данных натурального эксперимента. Поэтому для выявления возможностей и границ применимости сопоставляемых методов был предложен метод формирования искусственных временных реализаций разностей мгновенных фаз, позволяющий воспроизводить статистические свойства экспериментальных данных, включая: распределения длительностей синхронных и несинхронных участков, расстроек характерных частот собственных колебаний на несинхронных участках (характеризующих скорость нарастания разности мгновенных фаз на таких участках) и спектральные свойства фазовых шумов. При этом появляется возможность формирования искусственных временных реализаций необходимой длительности и имеется объективная априорная информация о границах интервалов фазовой синхронизации.

С помощью предложенного метода были сформированы тестовые временные реализации длительность которых соответствовала 10000 характерных периодов колебаний. Исследование проводилось при различных уровнях интенсивности фазового шума. При анализе таких тестовых временных реализаций были построены т.н. ROC-кривые (Receiver Operating Characteristic) зависимости по осям которых отложены чувствительность (вероятность детекции интервалов фазовой синхронизации) и специфичность (вероятность детекции несинхронных участков) рассчитанные при разных наборах свободных параметров методов и при разном уровне измерительного шума в сигналах. Результаты такого анализа представлены на рисунке 4.

Показано, что метод, предложенный в диссертации, демонстрирует лучшее соотношение чувствительности и специфичности при различных уровнях шумов (соответствующая предложенному методу кривая всегда остается выше двух других).

Сопоставление работоспособности методов при наличии в реализации мгновенной разности фаз шумов различной интенсивности показало, что при малых уровнях шумов методы, основанные на расчете коэффициента фазовой когерентности и коэффициента диффузии фазы, демонстрируют близкие результаты, с ростом уровня шума чувствительность метода, основанного на расчете коэффициента фазовой когерентности, снижается быстрее двух других подходов.

Например, при значениях интенсивности фазового шума 0.02 рад^2 и 0.04 рад^2 чувствительность на уровне 0.9 при вероятности ложноположительных выводов 0.2 при анализе экспериментальных сигналов

³¹ Y.C. Lai, M.G. Frei, I. Osorio Detecting and characterizing phase synchronization in nonstationary dynamical systems // Physical Review E. 2006. V. 73. P. 26214.

исследуемых контуров регуляции может быть обеспечена только методом, предложенным в главе 2 (рис. 4б), а при более высоком уровне шума коэффициент фазовой когерентности не может обеспечить чувствительность 0.8 не при каких значениях параметров (рис. 4в).

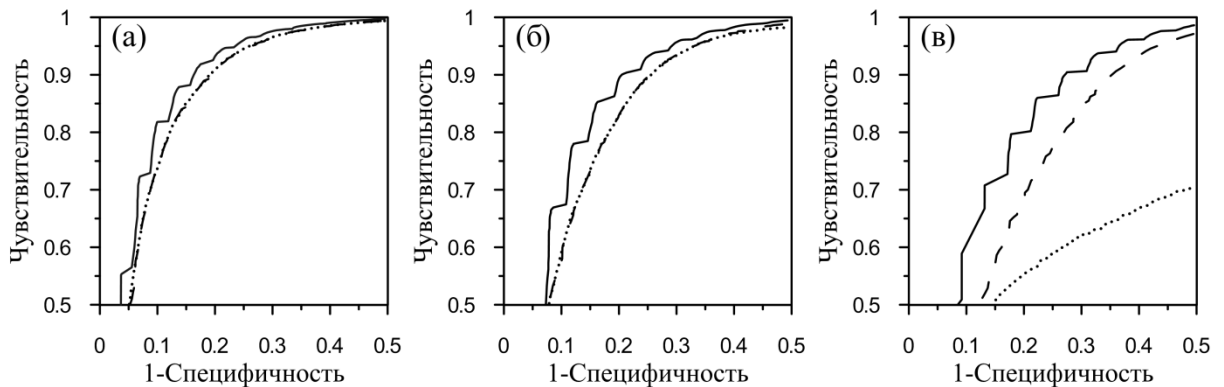


Рис. 4. ROC-кривые, построенные по результатам сопоставления методов определения границ интервалов синхронизации при значениях интенсивности фазового шума: (а) - 0.02 рад^2 , (б) - 0.04 рад^2 , (в) - 0.06 рад^2 относительно средней интенсивности шума в экспериментальных данных для модельной разности фаз. Точки - ROC-кривая для метода, основанного на расчете коэффициента фазовой когерентности, пунктир - для метода, основанного на расчете коэффициента диффузии фазы, сплошная линия - для предложенного метода, основанного на расчете углового коэффициента наклона аппроксимирующей прямой.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведенное сопоставление известных методов определения границ интервалов синхронизации при анализе временных реализаций неавтономного нелинейного осциллятора, находящегося под воздействием линейно-частотно-модулированным гармоническим сигналом, а также временных реализаций автономного осциллятора, к которым линейно подмешивался такой линейно-частотно-модулированный сигнал, показало, что методы, основанные на анализе в скользящем окне коэффициента фазовой когерентности, расчете синхрограмм, построении вейвлет-спектров и анализе разности мгновенных фаз, полученной с помощью специализированной методики, основанной на вейвлет-преобразовании, позволяют различить синхронизацию и паразитный эффект просачивания, характерный для многих натуральных систем и представляющий собой линейное смешивание сигналов в измерительном канале.

2. Апробация ряда известных методов определения границ интервалов синхронизации неавтономных генераторов при анализе экспериментальных временных реализаций хаотического генератора с обратной запаздывающей связью с квадратичной нелинейностью, находящегося под воздействием линейно-частотно-модулированного гармонического сигнала при различных амплитудах внешнего воздействия продемонстрировала, что методы, основанные на анализе в скользящем окне коэффициента фазовой когерентности, расчете синхрограмм, построении вейвлет-спектров и анализе разности мгновенных фаз, полученной с помощью специализированной

методики, основанной на вейвлет-преобразовании, дают близкие результаты при определении границ интервалов границ синхронизации.

3. Предложен метод определения границ интервалов фазовой синхронизации, позволяющий выявлять границы интервалов фазовой синхронизации при анализе нестационарных временных реализаций взаимодействующих автогенераторов, для которых характерно чередование интервалов синхронизации и несинхронного поведения.

4. Работоспособность предложенного метода определения границ интервалов фазовой синхронизации, основанного на кусочно-линейной аппроксимации разности мгновенных фаз методом наименьших квадратов и контроле угла наклона аппроксимирующей прямой, продемонстрирована при анализе временных реализаций эталонных нелинейных осцилляторов и экспериментальных данных биологической природы.

5. Предложен метод формирования искусственных нестационарных временных реализаций мгновенных фаз позволяющая воспроизводить характерную для некоторых систем динамику с чередованием интервалов фазовой синхронизации и несинхронного поведения.

6. В ходе анализа искусственно приготовленных нестационарных временных реализаций разности мгновенных фаз проведено сопоставление методов определения границ интервалов синхронизации, выявившее более высокую чувствительность предложенного метода, основанного на кусочно-линейной аппроксимации разности мгновенных фаз с контролем угла наклона аппроксимирующей прямой, по сравнению с известными методами, основанными на оценке коэффициента фазовой когерентности и коэффициента диффузии фазы.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Боровкова Е.И., Караваев А.С., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Безручко Б.П. Диагностика частотного захвата в условиях воздействия сигналом переменной частоты // **Известия РАН. Серия Физическая**. 2011. Т. 75. N. 12. С. 1704-1708.
2. Боровкова Е.И., Караваев А.С., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д. Сопоставление методов диагностики фазовой синхронизованности по тестовым данным, моделирующим нестационарные сигналы биологической природы // **Известия Саратовского университета Новая серия Серия Физика**. 2015. Т. 15. N. 3. С. 36-42.
3. Боровкова Е.И. Сопоставление методов диагностики синхронизованности нестационарных данных биологической природы // Тезисы докладов молодых ученых XVII научной школы «Нелинейные волны–2016». 2016. С. 37.
4. Боровкова Е.И., Караваев А.С. Численная мера для оценки степени фазовой синхронизованности // Сборник трудов Всероссийской школы–семинара «Волновые явления в неоднородных средах–2010». 2010. С. 2-6.
5. Боровкова Е.И., Караваев А.С., Пономаренко В.И. Исследование фазовой синхронизации 0.1 Гц ритмов регуляции сердечно–сосудистой системы при воздействии световых и звуковых импульсов записям // Тезисы X Всероссийская научная конференция «Наноэлектроника, Нанопотоника и Нелинейная Физика». 2015. С. 24-25.
6. Боровкова Е.И., Караваев А.С. Диагностика частотного захвата в условиях воздействия сигналом переменной частоты // Материалы XIII Всероссийской школы–семинара «Физика и применение микроволн–2011». 2011. С. 3-6.
7. Боровкова Е.И. Исследование синхронизации 0.1 Гц подсистем регуляции

сосудистого тонуса и частоты сердечных сокращений для диагностики состояния сердечно-сосудистой системы человека // Сборник трудов участников «Всероссийского молодежного конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области физических наук». 2012. С. 318-322.

8. Боровкова Е.И., Ишбулатов Ю.М., Сказкина В.В., Караваев А.С. Количественная мера диагностики фазовой синхронизованности 0.1 Гц ритмов регуляции сердечно-сосудистой системы по многочасовым записям // Тезисы X Всероссийская научная конференция «Наноэлектроника, Нанофотоника и Нелинейная Физика». 2015. Р. 22-23.

9. Боровкова Е.И., Караваев А.С. Сопоставление методов количественной оценки фазовой синхронизованности на моделях фазовых осцилляторов // Тезисы X Всероссийская научная конференция «Наноэлектроника, Нанофотоника и Нелинейная Физика». 2015. С. 20-21.

10. Рубан (Боровкова) Е.И., Егоров Д.В., Киселев А.Р., Гриднев В.И. Зависимость статистической значимости оценки степени синхронизованности в кардиосистеме от спектральных свойств сигналов // Материалы ежегодной Всероссийской научной школы-семинара «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине-2007». 2007. С. 55-56.

11. Рубан (Боровкова) Е.И., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Караваев А.С. Выбор параметров методики расчета суммарного процента фазовой синхронизации между ритмами сердечно-сосудистой системы // Тезисы докладов VIII научной конференции «Нелинейные колебания механических систем-2008». 2008. Р. 293-295.

12. Karavaev A.S., Prokhorov M.D., Ponomarenko V.I., Kiselev A.R., Gridnev V.I., Ruban (Borovkova) E.I., Bezruchko V.P. Synchronization of low-frequency oscillations in the human cardiovascular system // **CHAOS**. 2009. V. 19. P. 33112.

13. В.В. Сказкина, А.Р. Киселев, Е.И. Боровкова, В.И. Пономаренко, М.Д. Прохоров, А.С. Караваев Оценка синхронизованности контуров вегетативной регуляции кровообращения по длительным временным рядам // **Нелинейная динамика**. 2018. Т. 14. N. 1. С. 17-30.

14. Безручко Б.П., Гриднев В.И., Караваев А.С., Киселев А.Р., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Рубан (Боровкова) Е.И. Методика исследования синхронизации колебательных процессов с частотой 0.1 Гц в сердечно-сосудистой системе человека // **Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика**. 2009. Т. 17. N. 6. С. 44-56.

15. Караваев А.С., Ишбулатов Ю.М., Боровкова Е.И., Кульминский Д.Д., Хорев В.С., Киселев А.Р., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д. Реконструкции модельных уравнений систем с запаздыванием по коротким экспериментальным реализациям // **Известия Саратовского Университета. Новая серия. Серия Физика**. 2016. Т. 16. N. 1. С. 17-24.

16. Караваев А.С., Киселев А.Р., Гриднев В.И., Боровкова Е.И., Прохоров М.Д., Посненкова О.М., Пономаренко В.И., Безручко Б.П., Шварц В.А. Фазовый и частотный захват 0.1 Гц-колебаний в ритме сердца и барорефлекторной регуляции артериального давления дыханием с линейно меняющейся частотой у здоровых лиц // **Физиология человека**. 2013. Т. 39. N. 4. С. 93-104.

17. Kiselev A.R., Mironov S.A., Karavaev A.S., Kulminsky D.D., Skazkina V.V., Borovkova E.I., Shvartz V.A., Ponomarenko V.I., Prokhorov M.D. A comprehensive assessment of cardiovascular autonomic control using photoplethysmograms recorded from the earlobe and fingers. // **Physiological Measurement**. 2016. V. 37. N. 4. P. 580-595.

18. Kiselev A.R., Karavaev A.S., Gridnev V.I., Prokhorov M.D., Ponomarenko V.I., Borovkova E.I., Shvartz V.A., Ishbulatov Y.M., Posnenkova O.M., Bezruchko V.P. Method of estimation of synchronization strength between low-frequency oscillations in heart rate variability and photoplethysmographic waveform variability // **Russian Open Medical Journal**. –2016. –V. 5. –№. 1. –P. 101.

19. Боровкова Е.И., Караваев А.С., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Киселев А.Р.,

- Гриднев В.И., Безручко Б.П. Программа для диагностики фазовой синхронизованности систем по нестационарным данным в реальном времени, (Synchro-RT). № 2015662373.
20. Боровкова Е.И., Шварц В.А., Караваев А.С., Киселев А.Р., Бокерия О.Л. Программа для выделения неэквилидистантного временного ряда кардиоинтерваллов из реализации фотоплетизмограммы (PPG-RR-extractor Integro). № 2015662811.
21. Боровкова Е.И., Шварц В.А., Караваев А.С., Киселев А.Р., Бокерия О.Л. Программа для выделения неэквилидистантного временного ряда RR интервалов из реализации фотоплетизмограммы по максимальным значениям пульсовых волн, реализуемый в реальном времени (PPG-RR-extractor). № 2015662449.
22. Шварц В.А., Боровкова Е.И., Киселев А.Р., Ишбулатов Ю.М., Миронов С.А., Караваев А.С., Бокерия О.Л. Программа для выделения неэквилидистантной кардиоинтерваллограммы из фотоплетизмограммы по быстро нарастающему переднему фронту пульсовой волны, реализуемый в реальном времени (PPG-RR-extractor LE). № 2015662448.
23. Киселев А.Р., Караваев А.С., Пономаренко В.И., Боровкова Е.И., Миронов С.А., Шварц В.А., Ишбулатов Ю.М., Прохоров М.Д., Бокерия О.Л. Программа для предварительного выделения низкочастотных составляющих физиологических ритмов для адаптивного сжатия данных (Smart Biocompressor). № 2015662545.
24. Караваев А.С., Киселев А.Р., Кульминский Д.Д., Боровкова Е.И., Прохоров М.Д., Пономаренко В.И., Гриднев В.И., Безручко Б.П., Шварц В.А. Микрокод автономного носимого устройства для длительной регистрации пальцевой фотоплетизмограммы (Микрокод-М 6.0). № 2015662789.
25. Безручко Б.П., Караваев А.С., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Рубан (Боровкова) Е.И. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ Программа для исследования спектральных свойств сигнала с помощью различных методов оценки спектра мощности (SpectraEstimator). № 2010611341.
26. Безручко Б.П., Гриднев В.И., Караваев А.С., Киселев А.Р., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Рубан (Боровкова) Е.И. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Программа для выделения последовательности RR-интервалов электрокардиограммы и построения эквилидистантой кардиоинтервалограммы (Extracor). № 2010611339.
27. Безручко Б.П., Гриднев В.И., Егоров Д.В., Караваев А.С., Киселев А.Р., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Рубан (Боровкова) Е.И. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ Программа для исследования синхронизованности между ритмами сердечно-сосудистой системы человека с контролем статистической значимости результатов (Синхрокард). № 2008613908.