

УТВЕРЖДАЮ:

Директор
Саратовского филиала ФГБУН
«Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН»
доктор физико-математических наук,
профессор



Юрий Александрович Филимонов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Саратовского филиала ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им.
В.А. Котельникова РАН»

по диссертации **Боровковой Екатерины Игоревны** «Разработка и апробация методов определения границ интервалов синхронизации по нестационарным временным рядам» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика», выполненной на кафедре динамического моделирования и биомедицинской инженерии факультета нано- и биомедицинских технологий ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» Министерства образования и науки Российской Федерации и в лаборатории моделирования в нелинейной динамике Саратовского филиала ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН».

Соискатель Боровкова Е.И. в 2012 году окончила ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» по направлению «Биомедицинская инженерия» с присуждением квалификации «Магистра техники и технологии». Диплом ОН №00028 регистрационный номер 606, дата выдачи 02.07.2012 года.

Боровкова Е.И. обучалась в очной аспирантуре ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» по специальности «Радиофизика» с 01.10.2012 года по 01.10.2016 года. Приказ о зачислении № 180-Д от 28.09.2012 года, приказ об отчислении № 180-Д от 30.09.2016 года.

В период подготовки диссертации Боровкова Екатерина Игоревна работала младшим научным сотрудником в Саратовском филиале ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН».

Научный руководитель - Караваев Анатолий Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», старший научный сотрудник лаборатории моделирования в нелинейной динамике Саратовского филиала ФГБУН «Институт

радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН» представил положительный отзыв о диссертации и соискателе.

Научную экспертизу диссертация проходила на заседании секции Ученого совета ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН в Саратовском филиале 21 февраля 2018 года.

На заседании присутствовали 16 из 23 членов секции Ученого совета ИРЭ РАН в Саратовском филиале, утвержденных приказом директора ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН №40 о.д. от 17 августа 2015 г.

1. Филимонов Юрий Александрович, д.ф.-м.н., профессор, директор Саратовского филиала ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН»;

2. Селезнёв Евгений Петрович, д.ф.-м.н., заместитель директора Саратовского филиала ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН»;

3. Безручко Борис Петрович, д.ф.-м.н., профессор;

4. Высоцкий Сергей Львович, к.ф.-м.н.;

5. Зайцев Борис Давыдович, д.ф.-м.н., профессор;

6. Казаков Геннадий Тимофеевич, к.т.н.;

7. Кузнецов Александр Петрович, д.ф.-м.н., профессор;

8. Перепелицын Юрий Николаевич, к.ф.-м.н.;

9. Попов Вячеслав Валентинович, д.ф.-м.н., профессор;

10. Прохоров Михаил Дмитриевич, д.ф.-м.н., профессор РАН;

11. Рыскин Никита Михайлович, д.ф.-м.н., профессор;

12. Синицын Николай Иванович, д.ф.-м.н., профессор;

13. Торгашов Геннадий Васильевич, к.ф.-м.н.;

14. Ушаков Николай Михайлович, д.ф.-м.н., профессор;

15. Хивинцев Юрий Владимирович, к.ф.-м.н.;

16. Яфаров Равиль Кяшшафович, д.т.н.

Слушали доклад Боровковой Е.И., изложившей основное содержание и результаты диссертационной работы.

Докладчику были заданы вопросы от Безручко Б.П., Селезнева Е.П., Рыскина Н.М., Синицына Н.И., Кузнецова А.П.

Рецензенты диссертации:

Селезнёв Евгений Петрович, д.ф.-м.н., заместитель директора Саратовского филиала ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН», представил положительный отзыв.

Прохоров Михаил Дмитриевич, д.ф.-м.н., профессор РАН, представил положительный отзыв.

По итогам обсуждения диссертации единогласно принято следующее

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Диссертация Боровковой Е.И. посвящена разработке метода определения границ интервалов синхронизации нелинейных колебательных систем, а также апробации методов диагностики синхронизации при анализе нестационарных экспериментальных временных реализаций систем различной природы.

Тема диссертации и научный руководитель утверждены Учёным советом факультета нано- и биомедицинских технологий Саратовского государственного университета 12 ноября 2015 года (протокол №3).

Научная новизна работы.

1. Проведено сопоставление ряда известных методов определения границ интервалов синхронизации при анализе временных реализаций неавтономного нелинейного осциллятора, находящегося под воздействием линейно-частотно-модулированного гармонического сигнала, а также временных реализаций автономного осциллятора, к которым линейно подмешивался такой линейно-частотно-модулированный сигнал.
2. С помощью комплекса методов определения границ интервалов захвата фаз и частот на примере анализа временных реализаций, полученных в натуральных экспериментах, диагностированы границы синхронизации элементов регуляции кровообращения человека при воздействии линейно-частотно-модулированного внешнего сигнала.
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. Предложен метод 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 нового 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 филиала ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН», СГУ им. Н.Г. Чернышевского, СГТУ им. Ю.А. Гагарина, ООО "Наука и инновации" и др.

Положения, выносимые на защиту.

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.

Личный вклад соискателя. Постановка цели и задач диссертационной работы, интерпретация результатов осуществлялись совместно с научными руководителями. Обзор литературы, разработка метода диагностики фазовой синхронизации, анализ экспериментальных данных, создание компьютерных программ для обработки и анализа данных, проведение численных экспериментов и сравнительный анализ известных ранее и предложенного методов выполнены непосредственно автором.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы использовались при выполнении научно-исследовательских работ, проводимых в ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратовском филиале ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН», ФГБОУ ВО «Саратовский государственный медицинский университет имени В. И. Разумовского» Министерства

здравоохранения Российской Федерации и других организациях Российской Федерации, среди которых гранты Российского научного фонда (14-12-00291, 17-12-01008), Российского 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), стипендии Президента Российской Федерации (СП-3975.2013.4), Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Основные результаты диссертации были представлены на научных семинарах Саратовского филиала ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН», кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии факультета нано- и биомедицинских технологий ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» и на всероссийских школах: «Нелинейные волны», г. Н.Новгород, 2016; «Хаотические автоколебания и образование структур», г. Саратов, 2010; «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», г. Саратов, 2007-2016; «Нелинейные колебания механических систем», г. Н. Новгород, 2008, 2012; «Волновые явления в неоднородных средах», г. Звенигород, 2010; «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине», г. Саратов, 2008, 2009, 2010, 2014; «Биомедицинская инженерия», г. Пущино, 2007.

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликовано

9 статей в журналах, рекомендованных ВАК:

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. Karavaev A.S., Prokhorov M.D., Ponomarenko V.I., Kiselev A.R., Gridnev V.I., Ruban (Borovkova) E.I., Bezruchko B.P. Synchronization of low-frequency oscillations in the human cardiovascular system // **CHAOS**. 2009. V. 19. P. 33112.
4. 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.
5. 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.
6. 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.

7. 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.
8. 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.
9. 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 B.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. N. 1. P. 101.

9 свидетельств об официальной регистрации программ для ЭВМ:

1. 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.
2. Боровкова Е.И., Шварц В.А., Караваев А.С., Киселев А.Р., Бокерия О.Л. Программа для выделения неэквидистантного временного ряда кардиоинтерваллов из реализации фотоплетизмограммы (PPG–RR–extractor Integro). № 2015662811.
3. Боровкова Е.И., Шварц В.А., Караваев А.С., Киселев А.Р., Бокерия О.Л. Программа для выделения неэквидистантного временного ряда RR интервалов из реализации фотоплетизмограммы по максимальным значениям пульсовых волн, реализуемый в реальном времени (PPG–RR–extractor). № 2015662449.
4. Шварц В.А., Боровкова Е.И., Киселев А.Р., Ишбулатов Ю.М., Миронов С.А., Караваев А.С., Бокерия О.Л. Программа для выделения неэквидистантной кардиоинтерваллограммы из фотоплетизмограммы по быстро нарастающему переднему фронту пульсовой волны, реализуемый в реальном времени (PPG–RR–extractor LE). № 2015662448.
5. 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 Bioscompressor). № 2015662545.
6. 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.
7. 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.

8. 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 эквидистантой кардиоинтервалограммы (Extracor). № 2010611339.
9. 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.

9 тезисов и материалов международных и всероссийских научных конференций:

1. 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.
2. Боровкова Е.И. Сопоставление методов диагностики синхронизованности нестационарных данных биологической природы // Тезисы докладов молодых ученых XVII научной школы «Нелинейные волны-2016». 2016. С. 37.
3. 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 «Нанoeлектроника, Нанofотоника и Нелинейная Физика». 2015. С. 24-25.
4. 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.
5. 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.
6. 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 «Нанoeлектроника, Нанofотоника и Нелинейная Физика». 2015. Р. 22-23.
7. Боровкова Е.И., Караваев А.С. Сопоставление методов количественной оценки фазовой синхронизованности на моделях фазовых осцилляторов // Тезисы X Всероссийская научная конференция «Нанoeлектроника, Нанofотоника и Нелинейная Физика». 2015. С. 20-21.
8. 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.

9. 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.

Диссертационная работа Боровковой Е.И. представляет собой целостное исследование важных научных проблем и удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям, представляемым на соискание учёной степени кандидата наук.

Диссертация «Разработка и апробация методов определения границ интервалов синхронизации по нестационарным временным рядам» Боровковой Екатерины Игоревны рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика».

Заключение принято на секции Ученого совета ИРЭ РАН в Саратовском филиале на ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН 21 февраля 2018. Присутствовало на заседании 16 из 23 членов секции Ученого совета ИРЭ РАН в Саратовском филиале, утвержденных приказом директора ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН №40 о.д. от 17 августа 2015 г. Результаты голосования: «за» - 16 чел.; «против» - 0 чел.; «воздержалось» - 0 чел.; (протокол №2 секции Ученого совета ИРЭ РАН в Саратовском филиале на ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН от «21» февраля 2018 г.).

Председательствующий
заместитель директора Саратовского филиала
ФГБУН «Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН», д.ф.-м.н.

Селезнев Евгений Петрович



28.02.2018