

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧЕРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САРАТОВСКИЙ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра динамического моделирования и биомедицинской инженерии

**УТОЧНЕНИЕ ОЦЕНКИ СУММАРНОГО ПРОЦЕНТА ФАЗОВОЙ  
СИНХРОНИЗАЦИИ, ОСНОВАННОЙ НА УЧЕТЕ ЗАДЕРЖКИ МЕЖДУ  
НИЗКОЧАСТОТНЫМИ РИТМАМИ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ  
СИСТЕМЫ**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 2 курса 206 группы

направления 12.04.04 «Биотехнические системы и технологии»

код и наименование направления

факультета нано- и биомедицинских технологий

наименование факультета

Усова Олега Игоревича

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

ассистент, к.ф.-м.н

должность, уч. степень, уч. звание

дата, подпись

В.С. Хорев

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой:

д.ф.-м.н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание

дата, подпись

Е.П. Селезнев

инициалы, фамилия

Саратов 2016 г.

## 1 ВВЕДЕНИЕ

Согласно современным представлениям, состояние и степень активности подсистем регуляции деятельности сердечно-сосудистой системы являются чувствительным индикатором, отражающим степень развития различных патологий как в сердечно-сосудистой системе, так и в организме в целом. Вместе с тем, несмотря на доказанную информативность и важность анализа для медицинской диагностики, до последнего времени предложенные количественные меры оценки степени активности этих подсистем основывались на простейших методах статистического и спектрального анализа, не учитывая особенностей взаимодействия этих подсистем. Это можно объяснить сложностью исследуемых сигналов исследуемых систем, анализ которых требует разработки специализированных методов, основанных на современных методах нелинейной динамики и динамического моделирования.

Для живых организмов характерно существование различных сложных ритмических процессов, многие из которых взаимодействуют между собой. Наблюдение синхронизации между некоторыми ритмическими процессами, определяющими деятельность сердечно-сосудистой системы человека, привлекает исследователей во многих областях науки. Например, известно, что основной сердечный ритм может быть синхронизирован с дыханием.

В некоторых практических приложениях могут возникать проблемы с правильной оценкой уровня синхронизации из-за того, что связи являются запаздывающими, поэтому необходимо учитывать эту характеристику при оценке наличия силы связи.

В связи с этим важной и актуальной задачей является разработка и тестирование методов оценки наличия и силы воздействия по модельным временным рядам, а также оценка состояния сердечно-сосудистой системы и разработка методов ее диагностики.

Объектом исследования является взаимодействие между низкочастотными колебаниями в сердечном ритме и динамике кровенаполнения дистальных сосудов, соответствующими диапазону частот 0.05-0.15 Гц, который мы можем моделировать на примере эталонных систем. Данные колебания включают в себя ритм симпатической регуляции частоты сердечных сокращений и ритм барорефлекторной регуляции динамики тонуса сосудов.

Работа состоит из трех глав, заключения, списка используемой литературы и двух приложений. Мой личный вклад в работу состоит в написании компьютерных программ и обработке экспериментальных данных.

Первая глава работы состоит из описания экспериментальных данных исследуемых сердечно-сосудистых систем. Рассматривается способ обработки данных и проведен обзор моделей подсистем регуляции.

Вторая глава работы посвящена теоритической части определения связанности систем регуляции, а именно методам расчета индекса и суммарного процента фазовой синхронизации.

В третьей главе работы представлены полученные результаты расчета индекса и суммарного процента фазовой синхронизации модельных и экспериментальных данных.

**Научная новизна и значимость?**

**(Предполагая, что у реальных рядов сердечно-сосудистой системы имеется задержка в связи)**

## 2 ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Целью данной работы является исследование возможности уточнения значения суммарного процента фазовой синхронизации между низкочастотными ритмами в сердечно-сосудистой системе с помощью учёта задержки в связи между системами, оценённой с помощью индекса фазовой когерентности на примере модельных и реальных данных.

Работа состоит из трех глав, которых включают в себя по три параграфа. В основе первой главы работы лежит описание ритмов сердечно-сосудистой системы, обработки экспериментальных данных и моделей систем регуляции. Во второй главе изложены использованные методы определения взаимодействия между системами. В третьей главе представлены результаты, полученные по модельным и экспериментальным данным.

В первом параграфе первой главы описывается функционирование сердечно-сосудистой системы человека. Наиболее значимыми колебательными процессами, определяющими её динамику, являются основной сердечный ритм с частотой около 1 Гц, генерируемый кардиологическим водителем ритма, дыхание, имеющее обычно частоту порядка 0.3 Гц и процесс регуляции сосудистого тонуса и сердечного ритма, связанный с изменениями симпатической нервной активности и активности барорефлекса, имеющий у людей собственную частоту вблизи 0.1 Гц.

Согласно современным представлениям об организации системы вегетативного управления сердечно-сосудистой системой, для неё характерно наличие основного автоколебательного процесса в низкочастотном диапазоне спектра в области 0.1 Гц. Принято считать, что этот процесс характеризует основные свойства центрального звена сердечно-сосудистой системы.

Во втором параграфе первой главы описывается предварительная обработка экспериментальных данных. В работе использовались данные, для получения которых осуществлялась одновременная регистрация одноканальной

ЭКГ во II отведении и фотоплетизмограмма с дистальной фаланги кисти пациента.

Фотоплетизмограмма регистрирует оптическую плотность периферического капиллярного кровотока пальца руки. Исследуемый участок ткани просвечивается инфракрасным светом, который после рассеивания (или отражения, в зависимости от положения оптопары), попадает на фотопреобразователь. Интенсивность света, отраженного или рассеянного исследуемым участком пальца, определяется количеством содержащейся в нем крови. Пальцевая фотоплетизмография предоставляет в течение короткого периода времени точную и объективную информацию об изменениях параметров кровообращения, что предопределяет ее большую диагностическую ценность в оценке проходимости периферических сосудов, быстрой и точной оценки локального капиллярного кровотока. Кроме того, она отражает динамику ритма сосудистого русла.

В работе были использованы данные, полученные в лаборатории кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии СГУ (условно здоровые пациенты), а также из НИИ Кардиологии г. Саратова за 2004, 2005 и 2008 годы (здоровые и пациенты с инфарктом миокарда).

В кардиоинтервалограмме был выделен ритм в области 0.05 – 0.15 Гц, являющийся ритмом регуляции сосудистого тонуса и сердечного ритма, связанный с изменением регуляции активности симпатической нервной системы и барорефлекса [7]. Наряду с ритмом RR на частоте 0.1 Гц значимыми колебательными процессами, определяющими ее динамику, являются основной сердечный ритм с частотой около 1 Гц, генерируемый автономным водителем ритма в сердце, дыхание, имеющее обычно частоту порядка 0.3 Гц.

В третьем параграфе первой главы приведен обзор моделей подсистем регуляции. Наиболее информативным представляется анализ взаимосвязей на основе математических моделей исследуемых подсистем. Известны методы подобной реконструкции, основанные на работах Р. Такенса, С. Осовского и других. Методы вложения Такенса и нейроидентификации отличаются

универсальностью и позволяют строить информационные модели динамических систем. Однако эти модели, описывая «вход-выход», не отражают структуру исследуемой системы, не содержат физиологически обусловленных параметров. Перспективным представляется метод идентификации сложных систем, основанный на концепции модельных уравнений. В основе концепции лежит положение о том, что небольшое число сравнительно простых математических моделей дает ключ к пониманию и исследованию огромного количества различных явлений. Суть заключается в том, что априори предполагается, что, во-первых, имеются характерные типы движения, свойственные системам различной физической природы. Во-вторых, все физическое многообразие может быть представлено в форме достаточно простых модельных уравнений. Например, широко распространенное колебательное движение различных систем может быть описано уравнением Ван-дер-Поля. Такие базовые модели в отдельности хорошо изучены, их параметры имеют физическую интерпретацию, что позволяет строить на их основе модели сложных систем различной физической природы.

В первых двух параграфах второй главы описаны методы расчета индекса фазовой синхронизации. Для количественной характеристики синхронизации между двумя осцилляторами используется ряд показателей. В частности, популярны различные коэффициенты фазовой синхронизации, отражающие стабильность разности фаз колебаний.

В третьем параграфе второй главы описан метод расчета суммарного процента фазовой синхронизации. Степень синхронизованности анализируемых сигналов оценивалась с помощью расчета предложенной ранее интегральной численной меры степени фазовой синхронизованности – «суммарного процента фазовой синхронизации», представляющей собой сумму длин временных интервалов, на которых наблюдается фазовая синхронизация различных порядков  $n:m$ , отнесенную к длине реализации и выраженную в процентах.

В первом параграфе третьей главы продемонстрированы результаты расчета индекса и суммарного процента фазовой синхронизации на модельных рядах осциллятора Ван дер Поля. Для подтверждения предположения о том, что на задержке около двух секунд будут наблюдаться более точные результаты, представлены зависимости индексов связанности от уровня шума и коэффициента связи.

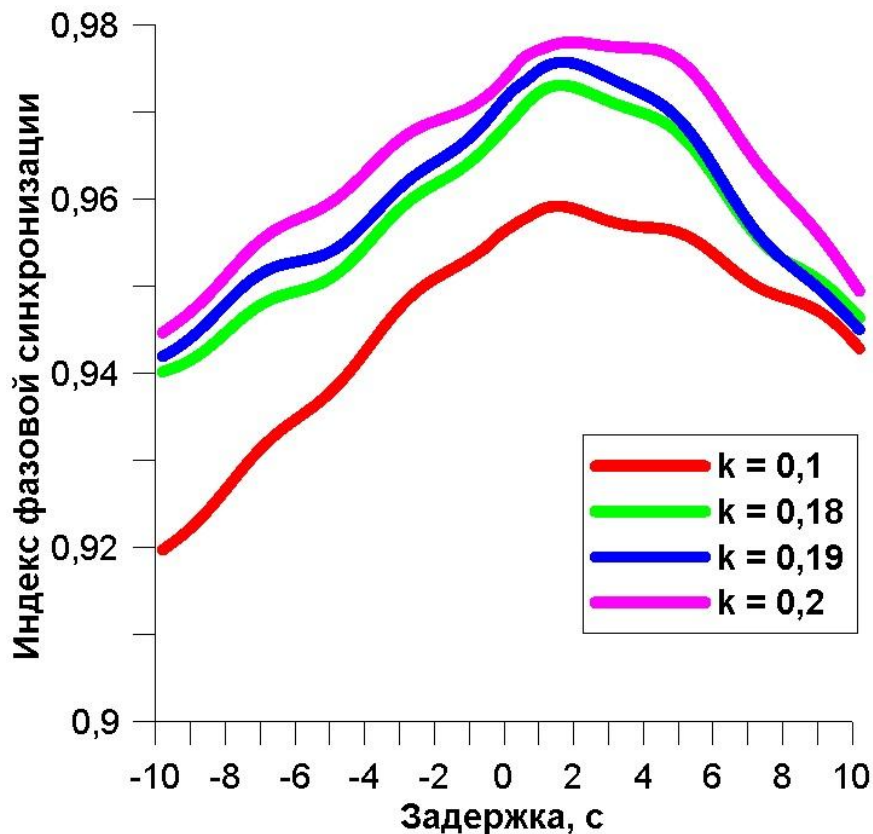


Рис. 1 – Зависимость индекса фазовой синхронизации от задержки в связи между двумя осцилляторами ван дер Поля с длиной ряда  $T = 20000$  секунд,  $dt = 0.1$ , динамический шум  $\xi = 0.3$ , расстройкой частот – 1 %, задержкой – 2 секунды, где  $k$  – диффузионная связь между осцилляторами.

На рис. 1 отображена зависимость индекса фазовой синхронизации от задержки для различных уровней связи между осцилляторами. Заметно, что с задержкой около 2 секунд наблюдается максимальный индекс фазовой синхронизации.

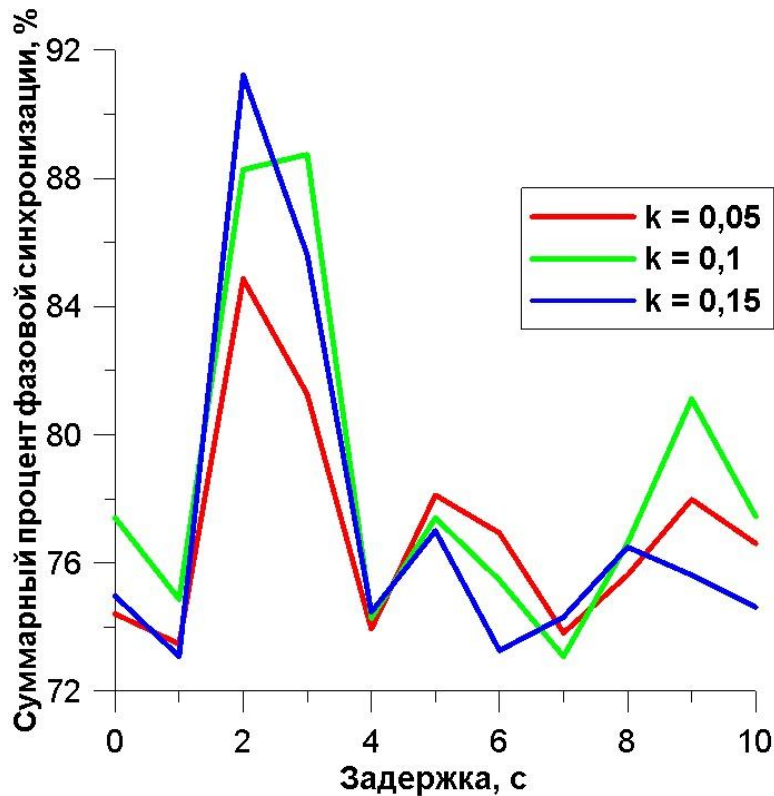


Рис. 2 – Зависимость суммарного процента фазовой синхронизации от задержки двумя осцилляторами ван дер Поля с длиной ряда  $T = 20000$  секунд,  $dt = 0.1$ , динамический шум  $\xi = 0.3$ , расстройкой частот – 1 %, задержкой – 2 секунды, где  $k$  – диффузионная связь между осцилляторами.

Параллельно была рассмотрена зависимость суммарного процента фазовой синхронизации от задержки также, как и с индексом фазовой синхронизации, последовательно изменяя связь между системами (рис. 2), где хорошо наблюдается максимальное значение на задержке около 2 секунд.

Основываясь на работах А. Стефановской и В.С. Анищенко можно утверждать, что даже простые модели в виде связанных осцилляторов оказываются удобными для моделирования сердечно-сосудистой системы в силу их возможности моделировать сложные колебания с различной степенью синхронности, наблюдаемой в ходе работы с реальными данными.

Во втором параграфе третьей главы продемонстрированы результаты по экспериментальным данным сердечно-сосудистой системы. Всем обследуемым без признаков сердечной патологии со средним уровнем физической активности (6 женщин и 19 мужчин), возраста от 18 до 32 лет со средним возрастом 22 года выполнялась одновременная регистрация



электрокардиограммы и сигнала кровяного давления со среднего пальца руки в горизонтальном положении тела. Критериями включения испытуемого в анализ являлись: доказанное отсутствие сердечно-сосудистой патологии, а также доказанное отсутствие прочих острых и хронических заболеваний, способных исказить результаты.

Все сигналы снимались с частотой 250 Гц при 16-ти разрядном разрешении, а затем обрабатывались на компьютере. Запись ФПГ, характеризующая колебания кровенаполнения сосудов ДСР, проводилась при помощи пульсоксиметрического датчика (в проходящем свете), помещенного на дистальной фаланге указательного пальца.

Сигнал дыхания регистрировался термодатчиком, омываемым потоком воздуха из носа и рта испытуемого.

Информацию о вариабельности сердечного ритма получали, путем выделения из ЭКГ последовательности КИГ, то есть, построением временных интервалов  $T_i$  между двумя последовательными R пиками. Откладывая по оси абсцисс вместо порядкового номера R-R интервала время появления R пиков, легко построить кардиоинтервалограмму.

Продолжительность каждой записи составляла 10 минут. Во время регистрации сигналов дыхание у всех обследуемых было произвольным. Ритм RR интервалов был выделен в области 0.05 – 0.15 Гц, являющийся ритмом регуляции сосудистого тонуса и сердечного ритма, связанный с изменением регуляции активности симпатической нервной системы и барорефлекса. Наряду с ритмом RR значимыми колебательными процессами, определяющими ее динамику, являются основной сердечный ритм с частотой около 1 Гц, генерируемый автономным водителем ритма в сердце и дыхание, имеющее обычно частоту порядка 0.3 Гц.

В работе построена зависимость индекса фазовой синхронизации от задержки связи реальных данных сердечно-сосудистой системы, которая изображена на рис. 3. Максимальное значение наблюдается на отрицательных

задержках от -2 до -4 секунд, которые соответствуют задержкам от 2 до 4 секунд.

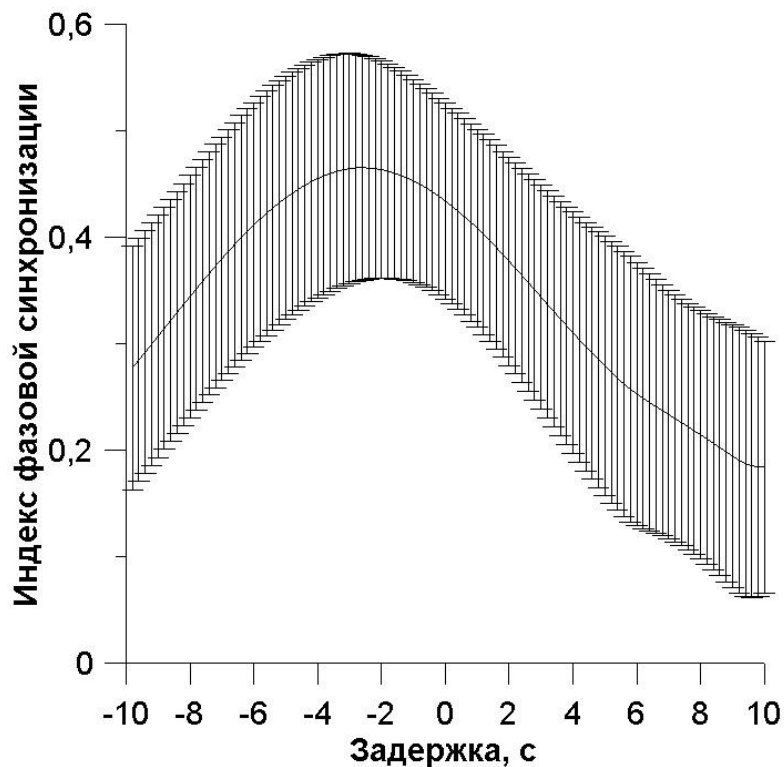


Рис. 3 – Зависимость индекса фазовой синхронизации 10-минутных записей сердечно-сосудистой системы практически здоровых людей от задержки связи между КИГ И ФПГ, где вертикальные линии – оценки ошибки среднего значения индекса фазовой синхронизации.

Также в данной работе проверялась нулевая статистическая гипотеза об отсутствии синхронизации между исследуемыми системами. Для этого случайным образом формировались 100 пар суррогатных реализаций, в которых реализации дыхания и сигнала регуляторной подсистемы были зарегистрированы с разных людей и заведомо не были связаны друг с другом.

На рис. 4 показана зависимость суммарного процента фазовой синхронизации реальных и суррогатных данных сердечно-сосудистой системы от задержки. Легко заметить, что синхронизация у реальных данных значительно выше, чем у суррогатных. Это явление подтверждает практичность рассчитанных результатов и говорит о том, что метод работает.

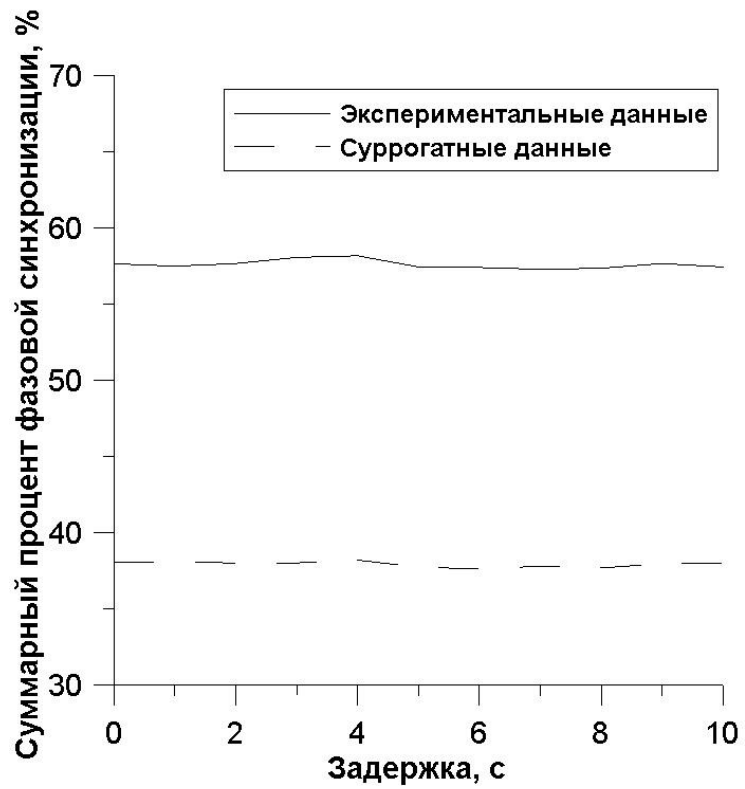


Рис. 4 – Зависимость суммарного процента фазовой синхронизации от задержки 2-х часовых записей сердечно-сосудистой системы 10-ти практически здоровых людей от задержки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были исследованы возможности оценки фазовой синхронизации с учетом задержки в связи между системами, оценённой с помощью индекса фазовой когерентности на примере модельных и реальных данных. А именно, было выяснено, что в некоторых случаях можно восстановить задержку в связи между двумя системами. Определили, что учет задержки в случае увеличения динамического шума позволяет получить более высокий уровень индекса фазовой синхронизации.

Показали, что в реальных данных сердечно-сосудистой системы задержка может приходиться на 3-4 секунды, но это не означает, что это реальные значения, поскольку это может быть вызвано сдвигом фаз между сигналами. Также показали, что полученные результаты оказались значимыми, подтвердив это проверкой на суррогатных данных. Выдвинули гипотезы относительно почему и каким образом учет задержки влияет на значения индекса фазовой синхронизации. И получили результаты, свидетельствующее в пользу того, что учет задержки позволяет получить наиболее высокий суммарный процент фазовой синхронизации, что в свою очередь говорит о более высоком уровне связи.