

Министерство образования и науки Российской Федерации

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

Кафедра информатики и программирования

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СИГНАЛОВ ДЫХАНИЯ НА
ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММЫ**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 441 группы
направления 02.03.03 Математическое обеспечение и администрирование
информационных систем
факультета компьютерных наук и информационных технологий
Слепухиной Марии Алексеевны

Научный руководитель:

доцент, к.ф.-м.н.

К. П. Вахлаева

Консультант:

доцент каф. динамического моделирования
и биомедицинской инженерии,

к.ф.-м.н., доцент

А. С. Караваев

Заведующий кафедрой:

к.ф.-м.н.

М. В. Огнева

Саратов 2018

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В настоящее время появляется все больше способов для массового анализа данных, основанных на системах искусственного интеллекта, методах обработки больших данных и компьютерного обучения. Соответственно, существует необходимость создания реалистичных моделей и алгоритмов их реализующих с целью генерирования исследуемых данных. Одной из областей, где подобная информация может быть крайне полезна, является медицина, ввиду того, что точные данные не всегда могут быть получены или интерпретированы корректно.

Цель бакалаврской работы: разработка программного продукта, реализующего модель электрокардиограммы (ЭКГ), находящуюся под воздействием дыхания. В связи с этим **поставлены задачи:**

1. Изучить метод математического моделирования ЭКГ с широким набором входных параметров для получения реалистичных электрокардиограмм.
2. Рассмотреть модификацию метода с учетом наложения параметров дыхания на модель ЭКГ.
3. Реализовать алгоритм генерирования показаний ЭКГ, включающий в себя численное решение системы дифференциальных уравнений и элементы спектрального анализа.
4. Реализовать программу с использованием фреймворка Spring Boot для языка Java, позволяющую задать ключевые параметры ЭКГ и процесса моделирования и продемонстрировать результаты работы метода.

Методологические основы работы включают в себя статьи Патрика МакШерри и его коллег из Оксфордского Университета [1, 2], описывающие математические способы генерирования кардиограмм, статьи А.С. Караваева [3], В.М. Хаютина [4] по генерации сигналов дыхания и некоторые статьи российских и европейских университетов [5–9] относительно исследований вариабельности сердечного ритма.

Практическая значимость бакалаврской работы. Разработанное приложение позволяет задавать все значимые параметры моделирования электрокардиограмм, включая наложение параметров вариабельности сердечного ритма, центральным из которых является сигнал человеческого дыхания. Кроме того, полученные графики представляются в формате списков пар

точек времени и значений напряжения на электрокардиограмме, что может быть использовано в дальнейшем как для отображения (и это реализовано в рамках данной работы), так и для программной обработки внешними инструментами с целью создания базы данных, содержащей информацию о связи между различными отклонениями морфологии сердечбиения и их отражениями на электрокардиограммах.

Структура и объём работы. Бакалаврская работа состоит из введения, двух разделов, заключения, списка использованных источников и 8 приложений. Общий объём работы — 90 страниц, из них 42 страницы — основное содержание, включая 5 рисунков, список использованных источников информации — 42 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первый раздел «Общие положения электрокардиографии и ее моделирования» вводит необходимый базис для понимания проблематики и основных понятий электрокардиографии, начиная с небольшого исторического описания подхода с точки зрения медицины. Далее вводятся и определяются ключевые сущности, отраженные на электрокардиограммах (ЭКГ) и дается физиологическое обоснование. Во второй половине раздела представлен алгоритм генерирования реалистичных электрокардиограмм человеческого сердца, а также способ наложения дыхания на модель, генерируемую данным алгоритмом. В конце раздела дается пошаговое описание алгоритма, который будет в итоге реализован в данной выпускной квалификационной работе.

«Применение электрокардиографии в реальной жизни» — подраздел дает небольшой экскурс в историю электрокардиографии, дает информацию о создателях метода [10–12], описывает его сферы применимости в кардиологии и дает обоснование утверждению об уникальности данного способа исследования сердечной деятельности.

«Морфология сердечного цикла» — подраздел, предоставляющий описание физиологического и биохимического базиса процессов, происходящих в сердце. Подраздел подробным образом описывает единичный цикл сердечного ритма, описывает процессы изменения электроотрицательности тканей миокарда (сердечной мышцы), дает химическое и физическое обоснования изменения показаний электрического тока в сердце. Здесь приводится описание процессов деполяризации и реполяризации мембран тканей при помощи натрий-калиевого обмена в клетках [13, 14]. В конце подраздела описываются ключевые точки единичного цикла, отражаемые на кардиограмме — P, Q, R, S, T, а также интервалы, которые они образуют, демонстрируется подтверждение факта о том, что отклонения этих интервалов могут быть обнаружены на кардиограмме, и что эти данные могут быть крайне важными при анализе состояния сердца и вынесении диагнозов.

«Вариабельность сердечного ритма» — ключевой подраздел, описывающий феномен неравномерности сердцебиения, заключающийся в том, что ввиду различных причин, связанных так или иначе с симпатическими парасимпатическими отделами нервной системы, ни один цикл сердечного ритма

полностью по времени и морфологии не совпадает с предыдущими. В разделе рассмотрен процесс колебания артериального давления, и различные волны, которые могут его вызывать: низкочастотные, высокочастотные, волны Маейра [9], волны медленно ритмической активности [7], а также дыхательные волны [4, 15]. Ссылаясь на рекомендованные источники отдается предпочтение двум видам волн: низкочастотные волны симпатической нервной системы, вызывающие изменения артериального давления, они же LF-волны (англ. low frequency — низкая частота) и дыхательные волны. Дается физиологическое обоснование данным волнам и приводится доказательство того, что данные волны могут быть выбраны в качестве фактора variability сердечного ритма, а соответственно, могут быть наложены на модель электрокардиограмм.

«Метод моделирования» — подраздел, полностью базирующийся на работах МакШерри [1, 2], который раскрывает модель представления электрокардиограмм в виде трехмерной сущности, описываемой системой обыкновенных дифференциальных уравнений, учитывающих морфологию сердцебиения, параметры дыхания и настройки моделирования. Приводится описание того, как будут использованы параметры variability сердечного ритма в виде подставленных в предоставленную систему уравнений значений RR-тахограмм, отображений продолжительности RR-интервалов (время между двумя R-пиками на электрокардиограмме) для каждой пары пиков. Далее, объясняется способ связи трехмерной модели системы и ее двумерной проекции, используемой для построения изображений электрокардиограмм. В конце подраздела описываются использованные методы для улучшения отображения финальных результатов модели в графическом виде.

«Наложение дыхания» — в подразделе указывается способ [3, 4] генерирования сигналов LF-волн и сигналов дыхания, их наложения и дальнейшего использования в моделировании электрокардиограммы, находящейся под воздействием дыхания.

Заключительный подраздел «Алгоритм моделирования» обобщает информацию, полученную из всего раздела, приводит перевод изображения оригинального алгоритма МакШерри и дает пошаговое подробное описание к предоставленному изображению, с учетом наложения параметров дыхания на данную модель.

Второй раздел «Разработка и реализация программного продукта» фокусируется на описании, во-первых, разработки предложенного алгоритма, а во-вторых, на разработке прикладного веб-приложения, соответствующего поставленным целям и требованиям.

«Список технологий, привлеченных к разработке» — подраздел, приводит описание требований, представляемых к языкам и библиотекам, которые должны быть использованы для реализации программного продукта. Производится сравнение доступных на сегодняшний день популярных подходов и делается выбор в пользу языка Java и фреймворка SpringBoot для создания веб-интерфейса пользователя. Также описывается способ отображения электрокардиограмм с использованием библиотеки Google Charts [16], способ экспорта результатов моделирования путем записи файлов с значениями в формате JSON (англ. JavaScript Object Notation — способ записи объектов JavaScript) и система сборки Java-приложений — Apache Maven [17].

«Основной класс моделирования» — в данном подразделе дается пошаговое описание класса и его ключевого метода, используемого для запуска процесса моделирования и возврата результата в место вызова. Ключевой метод включает вызов вспомогательных классов для генерирования RR-тахограмм, решения системы дифференциальных уравнений, масштабирование результатов и их проекция на двухмерную плоскость для дальнейшего отображения.

«Хранение результатов моделирования» — дается краткая справка о способах и методах представления результатов моделирования: пар времени и напряжения.

«Моделирование RR-тахограммы» — подраздел описывает алгоритм генерирования RR-тахограмм, включающий в себя: расчет количества необходимых точек для моделирования, вычисление значений в каждой из точек, на основе моделей дыхания и LF-волн, запуск обратного преобразования Фурье для приведения полученных значений к виду, который можно использовать в системе дифференциальных уравнений, и масштабирование этих значений относительно частоты сердечного ритма. В разделе приводится также описание алгоритма Кули-Тьюки обратного преобразования Фурье [18] и его реализация согласно рекомендуемым источникам.

«Численное решение системы уравнений» — подраздел, фокусирующий-

ся на реализации численного решения системы дифференциальных уравнений, описывающих модель электрокардиограмм. Если рассматривать процесс моделирования хронологически, то решение системы производится сразу после получения значений RR-тахограмм. Проекция системы на двумерную систему координат и масштабирование происходит после получения всех значений системы в рассматриваемых координатах, зависящих от частоты сэмпирования, числа моделируемых ударов и пульса. Данные соотношения и взаимосвязи также приводятся в этом разделе. Решение реализовано методом Рунге-Кутты четвертого порядка для систем [19].

«Пользовательский интерфейс» — подраздел, состоящий из нескольких пунктов, рассматривает концепцию разработки веб-приложения под названием Модель-Представлений-Контроллер и подробно описывает каждую из сущностей, используемых в данном подходе: класс запуска приложений, контроллер веб-страниц, представления (веб-страницы, созданные при помощи технологий Java Server Pages [20] и JavaServer Tag Library [21, 22]). В основном эта часть работы фокусируется на связи данных, необходимых для генерации модели, данных, полученных от классов моделирования, и их вывода на экран.

«Получение изображения ЭКГ» — подраздел, дающий информацию о библиотеке Google Charts [23–25] и ее способах ее интеграции в разрабатываемое приложение. Здесь описываются оптимальные настройки отображения модели электрокардиограммы в веб-приложении, включая возможности масштабирования рисунка и просмотра конкретных значений времени и напряжения.

«Класс конфигурации» > — подраздел, описывающий способ задания стандартных значений, базирующихся на статье МакШерри. Приводится список всех задаваемых в модели настроек, подразделяющихся на три основные группы: параметры создания модели (сэмплирование, пульс, добавочные шумы), параметры дыхания (LF-волны и волны дыхания), морфология сердца (мощность, продолжительность и фаза для каждой из P,Q,R,S,T точек). В подразделе также описаны средства SpringBoot [26] для загрузки базовых значений из файла настроек. Кроме того, описывается полный процесс запуска приложения с учетом использования классов этого типа.

«Экспорт данных» — здесь описываются способы сохранения получен-

ных данных моделирования в формат нотации объектов JavaScript (англ. JSON). В качестве библиотеки для работы с данным форматом была использована разработка Google — GSON [16,27] Подраздел показывает пошаговый процесс записи данных в файл и скачивания этого файла на компьютер пользователя.

«Пример моделирования» — в заключительном подразделе приводится краткий список ссылок на приложения выпускной квалификационной работы. Описания самих примеров расположены в соответствующих приложениях, равно как и параметры моделирования, которые были использованы для создания изображений электрокардиограмм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы был изучен и реализован метод моделирования реалистичных изображений электрокардиограмм человеческого сердца. Также была рассмотрена связь между сердцебиением и дыханием человека и способы отражения данной связи на ЭКГ.

В процессе реализации метода были рассмотрены, изучены и запрограммированы необходимые алгоритмы согласно использованным источникам, а именно: способ численного интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты четвертого порядка и процесс обратного преобразования Фурье методом Кули-Тьюки.

С целью создания прикладного программного продукта, позволяющего задавать параметры моделирования и отображать изображения ЭКГ, был изучен фреймворк SpringBoot для языка Java и способ его применения для создания динамических веб-страниц, обмена данных с механизмами моделирования и отображения графиков. Также, была изучена и использована библиотека Google Charts для более удобного взаимодействия с полученными изображениями ЭКГ, а именно прокруткой по временной оси, масштабированием, выбором значений. Кроме этого, реализован экспорт данных для дальнейшей обработки внешними инструментами.

Результаты моделирования при помощи полученного приложения были сверены с результатами источников, использованных в качестве теоретической базы данной работы, и соответствуют им.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 McSharry P.E. A dynamical model for generating synthetic electrocardiogram signals / P.E. McSharry, et. al // IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING. — 2003. — Vol. 50, no. 3. — Pp. 289–294.
- 2 McSharry P.E. Open-source software for generating electrocardiogram signals / P.E. McSharry, et. al. — 2004. — arXiv:physics/0406017.
- 3 Караваев А. С. Модель сердечно-сосудистой системы человека с автономным контуром регуляции среднего артериального давления / А. С. Караваев // Физиология человека. — 2018. — Т. 43, № 1. — С. 70–80.
- 4 Хаютин В. М. Колебания частоты сердцебиений: спектральный анализ / В. М. Хаютин // Вестник Аритмологии. — 2002. — Т. 26, № 1. — С. 10–21.
- 5 Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use / Task Force of The European Society of Cardiology and The North American Society of Pacing and Electrophysiology. — European Heart Journal, 1993.
- 6 Анализ вариабельности сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем / Комиссия по клинко-диагностическим аппаратам Комитета по новой медицинской технике МЗ РФ. — Вестник Аритмологии, 2001. — Т. 24.
- 7 Draghici A.E. The physiological basis and measurement of heart rate variability in humans / A.E. Draghici, J.A.. Taylor // Journal of Physiological Anthropology. — 2016. — Vol. 35, no. 22. — Pp. 1–8.
- 8 Billman G. E. The lf/hf ratio does not accurately measure cardiac sympathovagal balance / G. E. Billman // Front Physiol. — 2013. — Vol. 4, no. 26.
- 9 Julien C. The enigma of mayer waves: Facts and models / C. Julien // Cardiovascular Research. — 2006. — Vol. 70, no. 1. — Pp. 12–21.
- 10 Запечатлевший ритм сердца [Электронный ресурс]. — URL: <https://polymus.ru/ru/pop-science/blogs/channels/15386-nobelevskie-laureaty/16368/> (Дата обращения 25.05.2018). Загл. с экр.
- 11 Нобелевские лауреаты: Габриэль Липшман [Электронный ресурс]. — URL: <https://indicator.ru/article/2017/04/15/>

- nobelevskie-laureaty-gabriel-lippman/ (Дата обращения 25.05.2018).
Загл. с экр.
- 12 Холтеровское мониторирование [Электронный ресурс]. — URL: http://www.kardio.ru/profi_1/holter.htm (Дата обращения 29.05.2018). Загл. с экр.
 - 13 How the heart works [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.nhlbi.nih.gov/health-topics/how-heart-works> (Дата обращения 07.05.2018). Загл. с экр. Яз. англ.
 - 14 Физиология сердца [Электронный ресурс]. — URL: <http://blogmedika.ru/2008/10/26/fiziologiya-serdca/> (Дата обращения 07.05.2018). Загл. с экр.
 - 15 Burgess D. E. First order differential-delay equation for the baroreflex predicts the 0.4-hz blood pressure rhythm in rats / D. E. Burgess // American Journal of Physiology. — 1997. — Vol. 273. — Pp. R1878–R1884.
 - 16 Google GSON [Электронный ресурс]. — URL: <https://github.com/google/gson> (Дата обращения 26.05.2018). Загл. с экр. Яз. англ.
 - 17 Apache Maven Tutorial [Электронный ресурс]. — URL: <https://maven.apache.org/> (Дата обращения 07.05.2018). Загл. с экр. Яз. англ.
 - 18 Fast Fourier Transform: A Review / Columbia University. — NY, 1988. — 19 pp.
 - 19 Teukolsky S. Numerical Recipes / S. Teukolsky, W. H. Press. — Cambridge University Press, 2007.
 - 20 What Is a JSP Page? [Электронный ресурс]. — URL: <https://docs.oracle.com/javaee/5/tutorial/doc/bnagy.html> (Дата обращения 10.05.2018). Загл. с экр. Яз. англ.
 - 21 A JSTL primer [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.ibm.com/developerworks/library/j-jstl0211/index.html> (Дата обращения 17.05.2018). Загл. с экр. Яз. англ.
 - 22 Spring: JSP and JSTL [Электронный ресурс]. — URL: <https://docs.spring.io/spring/docs/3.0.0.M3/reference/html/ch17s02.html> (Дата обращения 17.05.2018). Загл. с экр. Яз. англ.

- 23 Charts [Электронный ресурс]. — URL: <https://developers.google.com/chart/> (Дата обращения 08.05.2018). Загл. с экр. Яз. англ.
- 24 How To Customize The Chart [Электронный ресурс]. — URL: https://developers.google.com/chart/interactive/docs/customizing_charts (Дата обращения 17.05.2018). Загл. с экр. Яз. англ.
- 25 Google Charts Quickstart [Электронный ресурс]. — URL: https://developers.google.com/chart/interactive/docs/quick_start (Дата обращения 17.05.2018). Загл. с экр. Яз. англ.
- 26 Creating and using bean definitions [Электронный ресурс]. — URL: <https://docs.spring.io/spring-javaconfig/docs/1.0.0.m3/reference/html/creating-bean-definitions.html> (Дата обращения 17.05.2018). Загл. с экр. Яз. англ.
- 27 GSON: SerializedName [Электронный ресурс]. — URL: <https://google.github.io/gson/apidocs/com/google/gson/annotations/SerializedName.html> (Дата обращения 08.05.2018). Загл. с экр. Яз. англ.