

**Автономная некоммерческая образовательная организация
Физтех-лицей им. П.Л. Капицы**



**XX научно-практическая конференция
«Старт в инновации»**

Исследовательская работа

Способ моделирования и классификации патологий миокарда на основе новых представлений о магнитофизике миокарда

Автор работы: ученик 9 Б класса
Семенов Илья Александрович

Руководитель: к.ф.-м.н.
Арутюнов Юрий Артёмович

Московская область, Долгопрудный
2021 г.

Содержание

Введение	3
1. Обзор исследований по теме	4
2. Исследование амплитудных значений магнитного поля образцов анатомически-подобных моделей миокарда	6
3. Разработка классификатора МГК-сигналов	9
Заключение	12
Список литературы	13

Введение

Возможность своевременного обнаружения патологий в работе сердца являются одной из главных задач современной медицины, поскольку заболевания сердечно-сосудистой системы, в т.ч. миокардиты, – лидеры по распространенности среди причин смерти пациентов. Одним из важнейших факторов для своевременного оказания медицинской помощи является быстрое и точное получение информации о состоянии здоровья пациента. Электрокардиография – процесс интерпретации электрической активности сердца, который позволяет оценить скорость и регулярность сердечных сокращений. Однако метод диагностики ЭКГ не позволяет оценить амплитуду сигнала, т.к. на электрический сигнал сердца влияет сопротивление мышечной ткани, крови, кожного покрова и пр., и единственный путь – относительное сравнение регистрируемых импульсов между собой. Более того, у миокардита нет специфических признаков электрокардиографического сигнала: проявления могут имитировать как ишемию, так и любые нарушения ритма и проводимости.

Новые возможности диагностики сердечных заболеваний открывает метод магнитокардиографии, позволяющий более точно локализовать область поражения миокарда. На амплитуду МКГ – все те органы и слои, которые находятся между сердцем и датчиком магнитного поля, не влияют, т.к. все без исключения являются не ферромагнитным материалом. Несколько лет назад было совершено открытие о том, что миокард имеет структуру листа Мебиуса. Это открытие дает возможность получить новые параметры миокарда, разработать классификацию патологий миокарда, используя новые представления о его анатомии. Исследования [1-10] показали, что механическая «развертка» построенной на основе новых представлений о морфологии миокарда модели не имитирует временной сигнал ЭКГ/МКГ. Это позволило выдвинуть **гипотезу**, о том, что о состоянии миокарда можно судить по амплитудным значениям импульсов магнитного поля сердца. В здоровом сердце амплитуда маленькая, в больном – амплитуда возрастает. В достоверность этой гипотезы говорят результаты МКГ из открытых источников.

Целью работы являлось исследование магнитофизических свойств моделей миокарда, соответствующих состояниям «норма» и «патология», для нахождения критерия детектирования воспаления миокарда и построения классификатора состояний миокарда на основе выявленных магнитофизических признаков.

Задачи работы:

1. Провести обзор работ по теме исследования.
2. Выполнить исследование амплитудных значений магнитного поля образцов анатомически-подобных моделей миокарда в зависимости от дополнительных магнитов.
3. Разработать программу автоматической диагностики состояний моделей миокарда.

Объектом исследования являются анатомически-подобные модели – имитаторы миокарда, соответствующие состояниям «норма» и «патология».

Предметом исследования являются магнитофизические свойства моделей миокарда и способы их детектирования.

Результатом является пороговый критерий детектирования воспаления миокарда и программа для автоматической диагностики состояния миокарда.

Практическая значимость: исследование позволит ввести критерий «здорового сердца» на этапе ранней диагностики, что дает возможность повысить достоверность диагностики, т.к. оценку по формализованному показателю вести проще. На основе выявленного признака разработана программа автоматической диагностики миокарда.

Новизна проекта. Используются принципиально новые подходы моделирования магнитофизических свойств миокарда на основе новых представлений о морфологии миокарда, способы диагностики патологий миокарда на основе собственной классификации патологий.

1. Обзор исследований по теме

Проведем обзор результатов, полученных на этапе разработки имитатора сердечных патологий и аппаратно-программного комплекса для выявления вероятности существования патологий миокарда на образцах-имитаторах, построенных на основе новых представлений о морфологии миокарда.

В работах [1-4] получены следующие основные результаты. Показано, что образцы имитатора миокарда сердца могут быть выполнены из полосы силикона размером: длина – 60 см, ширина 8 см, толщина 1 см с магнитным наполнителем мелкодисперсным магнитомягким порошком марки ПФБ 07-13-1200 ТУ 2663-002-48585564-2000. Опытным путем определены концентрация магнитной компоненты (70%) и ее влияние на усадку образца магнитоэласта (30 %). Разработаны устройства и способы намагничивания магнитоэласта (имитатора магнитного поля миокарда сердца). Проведен анализ имеющихся в свободной продаже датчиков, для измерения постоянного магнитного поля. Показано, что созданного образца может быть использован цифровой USB-датчик магнитного поля.

В работах [5-10] разработан опытный стенд. По результатам экспериментов подтверждена гипотеза о влиянии топологии магнитопровода на его приведенные характеристики, в области малых интенсивностей магнитных полей, сопоставимых с влиянием собственной намагниченности структуры. Показана качественная возможность характеризовать функциональный статус миокарда по результатам измерения напряженности магнитного поля.

Выводы.

1. Рассмотрен магнитопровод с топологией Мебиуса как элемент трансформатора. Для этого была разработана методика сравнительного анализа, подобрана необходимая измерительная аппаратура.

2. По результатам исследования сделан вывод, что топология магнитопровода оказывает свое влияние на распространение магнитного поля в том случае, когда создаваемые магнитные поля невелики и сопоставимы с уровнем остаточной намагниченности, создаваемой доменной структурой материала магнитопровода.

3. Проведена аналогия с миокардом сердца – как источником слабого магнитного поля и выдвинули гипотезу о том, что изменение магнитного поля сердца при его заболевании может быть связано с изменением топологии.

4. На основании анализа известных данных из литературных источников и результатов моделирования на образцах имитаторах показано, что амплитудное значение магнитного поля здорового и больного сердца различаются.

5. Выдвинули гипотезу о том, что для выявления заболеваний миокарда на ранних стадиях достаточно контролировать амплитудное значение магнитного поля.

В рамках исследуемого направления интерес представляют:

1. Анализ результатов исследований МКГ – и по ним наглядно подтвердить, что регистрации амплитудных значений магнитного поля достаточно для диагностики заболеваний сердца на ранней стадии:

Установление диапазона параметров соответствующих «норме» и патологии»

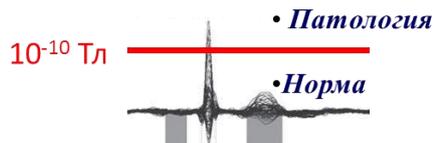


Рисунок 1. Определение критерия детектирования «нормы» и «патологии»

2. Исследования на имеющихся образцах имитаторах с использованием «дополнительно» накладываемых на образец магнитов (имитируют миокардит) для

определения при каком расположении «воспаленного» участка регистрация только амплитудных значений позволит выявить заболевание на ранней стадии.

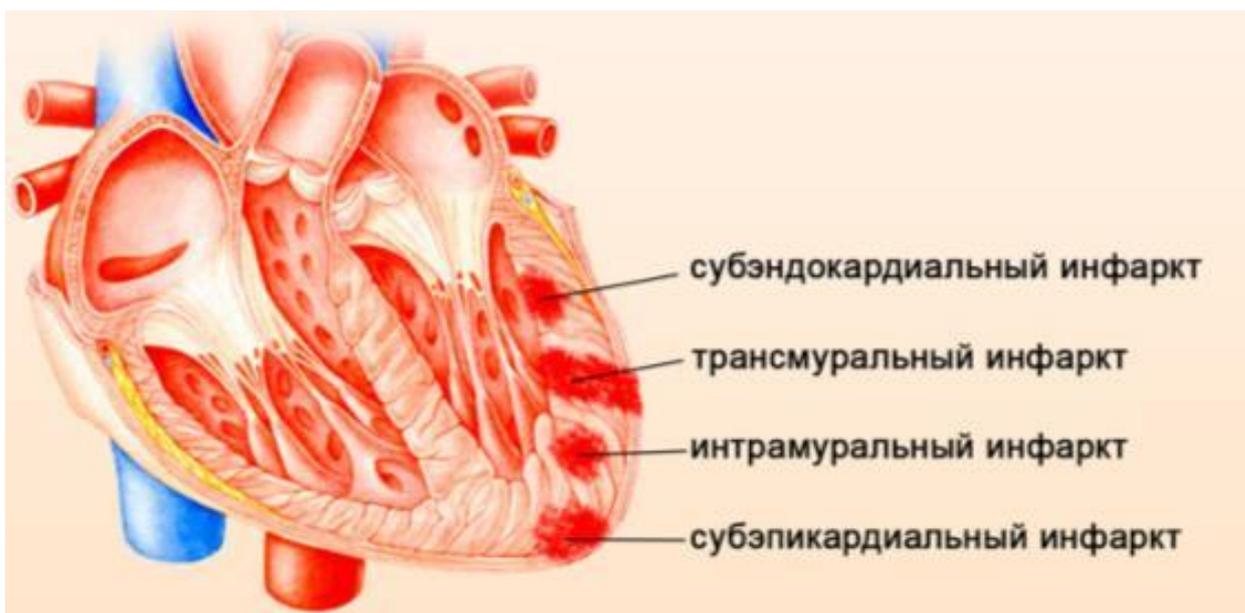


Рисунок 2. Возможные патологии миокарда, моделируемые накладыванием дополнительных магнитов

3. На имеющихся образцах-имитаторах, используя «дополнительно» накладываемые на образец магнетики (имитируют миокардит) провести исследование, а при каком магнитном поле дополнительных магнитов, имитирующих «воспаленный» участок миокарда, регистрация только амплитудных значений позволит выявить заболевание на ранней стадии.

2. Исследование амплитудных значений магнитного поля образцов анатомически-подобных моделей миокарда

Исследование амплитудных значений магнитного поля образцов анатомически-подобных моделей миокарда направлено на определение порогового значения амплитуды магнитного поля образцов с целью классификации нормальных и патологических состояний миокарда.

Пусть задано n -эталонных сигналов ЭКГ, каждый из которых соответствует определенному состоянию миокарда. Обнаружение порогового значения выполним по методу максимальной корреляционной связи: если определяется максимальная достоверная корреляционная связь между измеряемым сигналом и эталонным сигналом конкретного класса, принимается решение о принадлежности измеряемого сигнала к этому типу класса эталона. Пороговое значение амплитуды магнитного поля образцов определяется эмпирически путем регистрации сигналов с исследуемых моделей-образцов и корреляционного анализа полученных сигналов с эталонными сигналами ЭКГ, которые были загружены с банка данных PhysioNet (база данных биомедицинских исследований ЭКГ) [11].

В ходе исследования снимались показания с морфологически-подобной модели миокарда путем регистрации магнитного поля с помощью датчика-миллигауссметра.

Модель миокарда «норма» (далее образец) изготовлена из гибкого материала с параметрами: длина 60 см, ширина 8 см, толщина 1 см. В пластичную основу полосы как основы имитатора миокарда сердца в качестве наполнителя был добавлен порошок ферромагнитного материала с целью создания и имитации магнитного поля. Полученный образец был «скручен» в тор с топологией Мебиуса. Образец создан в лаборатории ООО «Двойная спираль».

На образец «Норма» последовательно приклеивались магниты разной мощности и в разные области образца, имитируя, таким образом, миокардит – «воспаленный» участок миокарда.

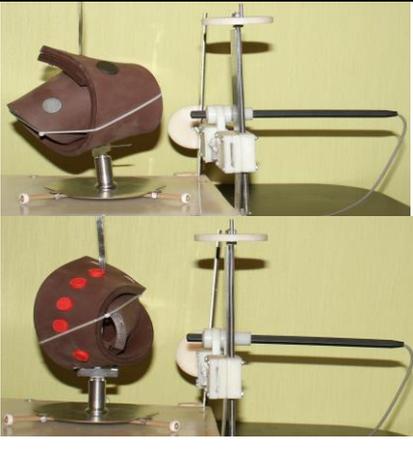
Модель миокарда «Патология» изготовлена по той же технологии, что и модель «норма». Отличие модели «патология» – толщина «ленты Мебиуса» составила 2 см за счет большего числа намагниченных опилок.

Регистрация сигналов выполнялась с применением специальной установки – модели магнитокардиографа. Стенд позволяет рассмотреть процесс формирования магнитного поля миокардом, изучить особенности регистрации магнитного поля сердца и исследовать влияние патологий миокарда на изменение магнитного поля. Основание стенда 1 содержит электропривод, обеспечивающий поворот предметного столика 2 вокруг оси, с закрепленным на ней образцом 3. На основании 1 закреплен привод линейного перемещения датчика 4, осуществляющего регистрацию напряженности магнитного поля образца.

Для регистрации сигналов магнитного поля моделей использовалась цифровая лаборатория «Радуга», которая предназначена для проведения экспериментов с использованием USB-датчиков различных физических параметров. Цифровая лаборатория используется совместно с персональным компьютером пользователя. Компьютерная программа позволяет произвести автоматическое распознавание подключенных датчиков, выбор и настройку вида отображения данных, фильтрацию данных, регистрацию, измерение и отображение на графиках входных сигналов от датчиков, работу с архивом зарегистрированных результатов опытов.

Описание исследуемых с применением метода МГК образцов приведено в таблице 1.

Таблица 1. Описание исследуемых образцов

Образец	Характеристика образца	Фото образца
Норма [Н]	изготовлена из гибкого материала с параметрами: длина 60 см, ширина 8 см, толщина 1 см. В пластиковую основу полосы добавлен порошок ферромагнитного материала. Имитирует работу здорового сердца	
Патология [П]	изготовлена из гибкого материала с параметрами: длина 60 см, ширина 8 см, толщина 3 см. В пластиковую основу полосы добавлен порошок ферромагнитного материала. Имитирует работу сердца с диагнозом «инфаркт».	
Патология [П 1-5]	изготовлена из гибкого материала с параметрами: длина 60 см, ширина 8 см, толщина 1 см. В пластиковую основу полосы добавлен порошок ферромагнитного материала. На модель накладывались дополнительные магниты от 1 до 5. Имитируют работу сердца с диагнозом дилатация.	

Для каждой модели было выполнено по 10 замеров длительностью по 10 минут. Выбор длительности регистрации сигнала магнитного поля объясняется тем, что данный интервал позволяет зарегистрировать сигнал, состоящий из трех пиков – наименьшее требование получения информативного сигнала. Общее число наблюдаемых переменных в пределах каждой серии составило 65 000 значений, что является достаточным с точки зрения статистической обработки данных.

Методика измерений.

1) Подключить устройство к сети и с помощью USB-порта к компьютеру (предварительно установив программу «Цифровая лаборатория»). Обеспечить «благоприятную обстановку» (убрать все вещи, которые «излучают» магнитное поле).

2) Закрепить образец модели на предметном столе установить датчик (миллигауссметр) в специальное крепление на определённом расстоянии от модели.

3) Включить устройство на 2 секунды.

4) Повторить результаты регистрации сигналов.

5) Полученные данные передать в программу Excel для последующей статистической обработки.

6) Выполнить статистическую обработку результатов измерений.

7) Выполнить анализ результатов.

Результаты обработки измерений представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты обработки измерений

Образец	Значения амплитуды, мЛТл			Корреляционная связь с эталоном	Эталон
	min	max	abs		
Н	-0,4647	0,57558	1,04033	обнаружена, достоверная	ЭКГ норм
П 1	-1,0962	1,70482	1,80105	обнаружена, недостоверная требуется доп. исследования	ЭКГ миокардит
П 2	-1,1156	1,70711	1,82280	обнаружена, недостоверная требуется доп. исследования	ЭКГ миокардит
П 3	-1,0987	1,69738	1,48609	обнаружена, недостоверная требуется доп. исследования	ЭКГ миокардит
П 4	-0,9523	5,83390	2,88628	обнаружена, достоверная	ЭКГ миокардит
П 5	-0,9460	5,94761	6,89369	обнаружена, достоверная	ЭКГ миокардит
П	-1,8908	5,48649	7,37732	обнаружена, достоверная	ЭКГ миокардит

Исследования на имеющихся образцах имитаторах с использованием «дополнительно» накладываемых на образец магнитов показали, что для образцов «патология» (П) и образцов П1 и П2 (4 и 5 магнитов) регистрация только амплитудных значений позволяет выявить заболевание на ранней стадии (обнаружена достоверная корреляционная связь между исследуемым сигналом и эталоном ЭКГ пациента с диагнозом «миокардит»).

Для образцов П1-П3 (1-3 магнита) обнаружены слабые связи с эталонными сигналами ЭКГ. Для сигнала «норма» обнаружена достоверная корреляционная связь с эталоном ЭКГ, соответствующим работе здорового сердца.

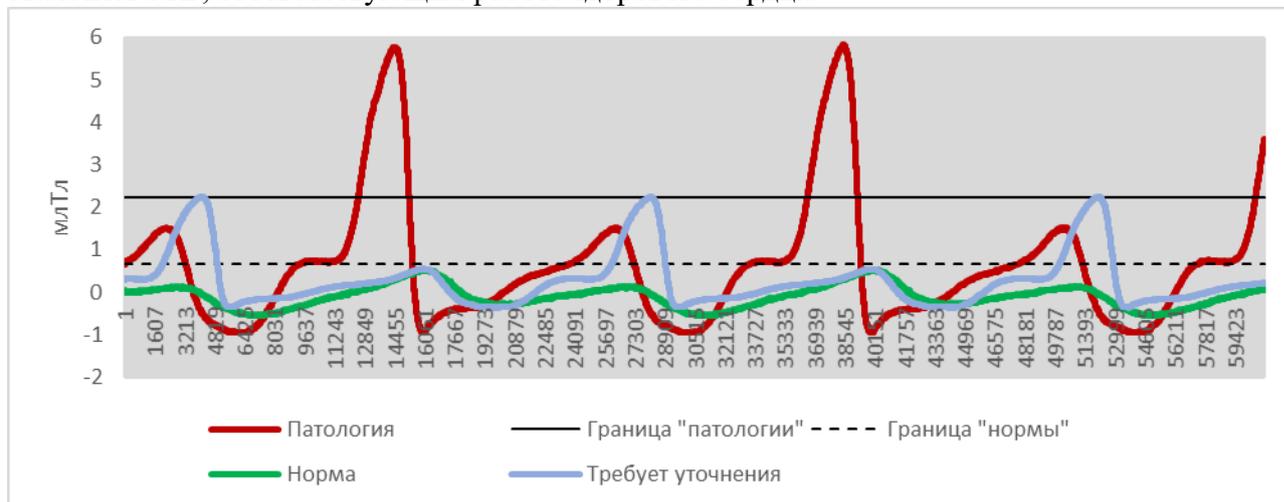


Рисунок 3. Пороговые значения «нормы» и «патологии»

Таким образом, для сигналов с амплитудой от 2,22 мЛТл и более могут быть отнесены к сигналам с «патологией», сигналы с амплитудой от 0,66 и менее – могут быть отнесены к сигналам «норма». Диапазон (0,66; 2,22) мЛТл является областью недостоверной диагностики. Для сигналов, характеризующихся амплитудой в этих пределах, требуется проведение дополнительных исследований.

3. Разработка классификатора МГК-сигналов

Исследование метода автоматического анализа МГК-сигналов. Автоматическое обнаружение сигналов «норма» и «патология» может быть решено как задача классификации. Задача классификации МГК-сигналов заключается в выявлении информативных признаков и нахождении их зависимости от соответствующего заболевания сердца или его отсутствия. Основными признаками нарушения работы сердца являются отклонения от нормы амплитуды напряженности магнитного поля. В работе рассмотрен подход на основе методов машинного обучения. Основными методами машинного обучения являются нейронные сети. Нейронные сети – набор алгоритмов, принимающих на вход ряд параметров изучаемого объекта X , и выводящих на выход ответ Y .

Элементарной единицей нейронной сети является нейрон – алгоритм, принимающий на вход k -тое количество элементов i , и выводящий на выход выражение вида [12]:

$$o = a \left(\sum_{n=1}^k (i_n \cdot W_n) + W_b \right), \quad (1)$$

где a – функция активации нейрона;

W_n – весовой коэффициент соответствующего входа;

W_b – коэффициент отклонения.

Функция активации нейрона – функция, определяющая зависимость входного сигнала от нормализованных значений интервала $[0; 1]$ или $[-1; 1]$.

Весовые коэффициенты характеризуют значимость соответствующего ему входа и определяются в ходе процесса обучения НС. Весовой коэффициент – основная характеристика связи между нейронами, называемой синапсом.

Функционал ошибки – функция, определяющая зависимость значения весового коэффициента от отклонения выхода НС, использовавшей данное значение. Целью обучения нейронной сети является определение весовых коэффициентов, при которых отклонение выхода нейронной сети будет минимально.

Классификатор разработан на основе нейронной сети LSTM с 1 входным нейроном (по числу учитываемых параметров). Нейронная сеть имеет 5 слоев со следующими параметрами:

1	"	Sequence Input	Sequence input with 1 dimensions
2	"	BiLSTM	BiLSTM with 100 hidden units
3	"	Fully Connected	2 fully connected layer
4	"	Softmax	softmax
5	"	Classification Output	crossentropyex

Для обучения искусственной нейронной сети использовался алгоритм обратного распространения ошибки [12]. Был подготовлен набор данных из 200 эпизодов МГК (обучающая выборка 50%, валидационная выборка 30%, и тестовая выборка 20%). Подготовленные входные данные (промаркированы по классам N – норма и P – патология) подаются на входной слой нейронной сети, выходной слой которой диагностирует состояние модели как нормальное (здоров) или патология.

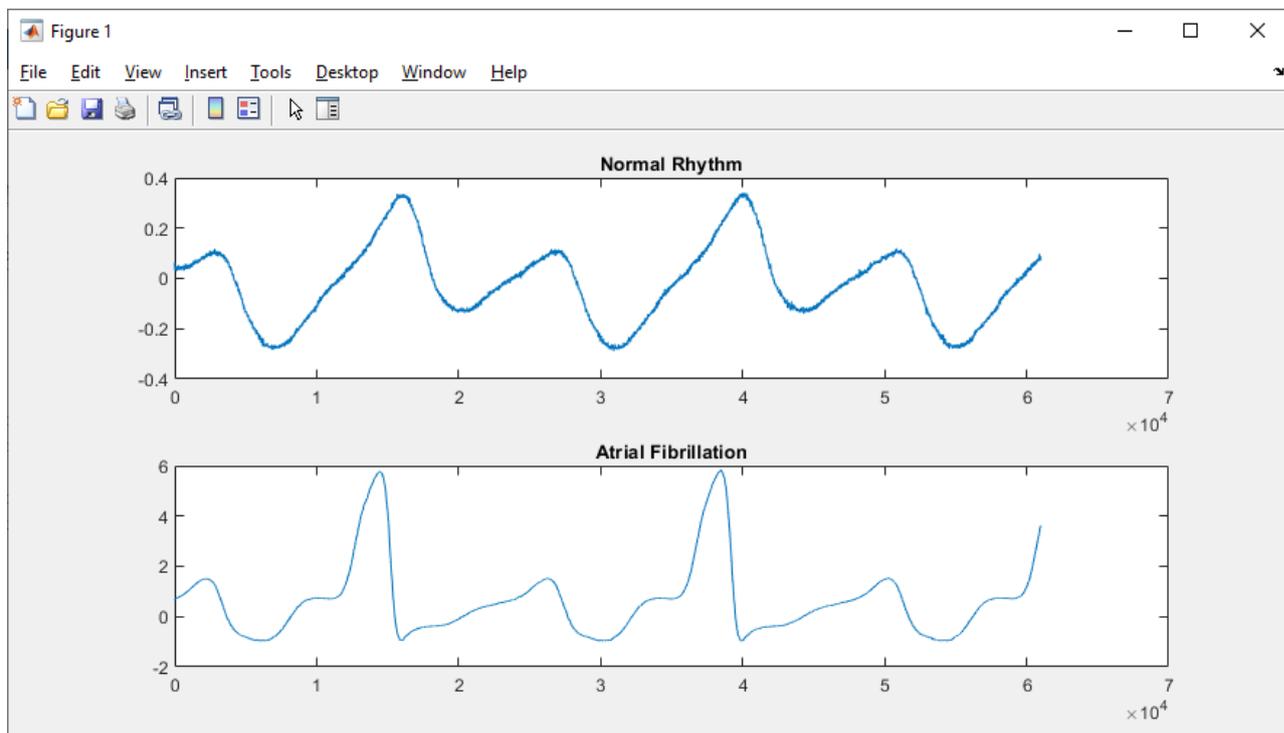


Рисунок 4. Пример анализа сигналов в среде разработки Matlab

Пример графика оценки процесса обучения классификатора интенций отображен на рисунке 5.

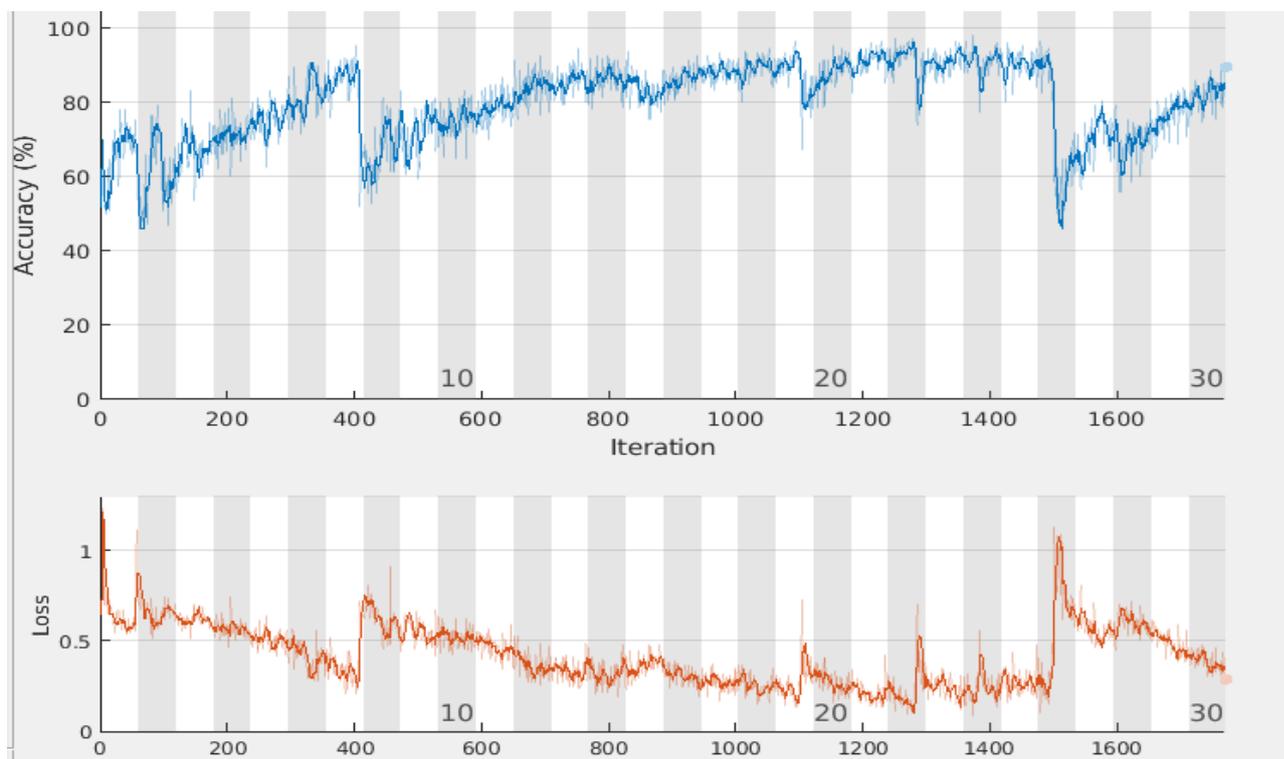


Рисунок 5. Прогресс обучения классификатора

Точность обучения классификатора составила 81%. Значит, разработанная нейросетевая модель может быть использована для автоматического определения состояния миокарда.

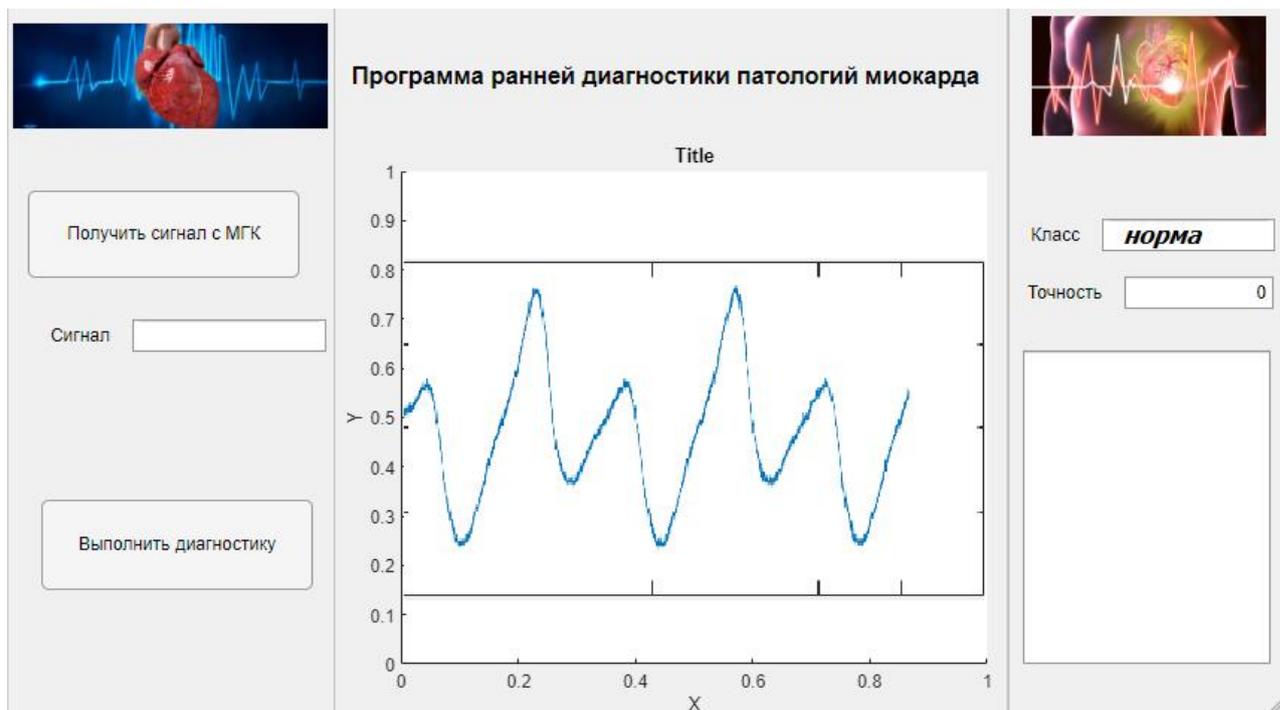


Рисунок 6. Пример работы программы автоматического определения состояния миокарда

В работе предложен алгоритм классификации МГК сигналов на формы, относящиеся к фоновому ритму («норма») и отклоняющиеся от него («патология»). В качестве признака, который использовался для обучения классификатора, использовалась амплитуда МКГ сигнала: низкий уровень МКГ – все в «порядке»; высокий – нарушения в миокарде. Результаты работы классификатора продемонстрировали высокие показатели оценки точности. Представленный подход к анализу форм МГК сигналов может быть взят за основу для разработки устойчивого алгоритма ранней диагностики патологий миокарда на основе новых представлений о магнитофизике миокарда.

Заключение

В работе подтверждена гипотеза, о том, что о состоянии миокарда можно судить по амплитудным значениям импульсов магнитного поля сердца. В здоровом сердце амплитуда маленькая, в больном – амплитуда возрастает.

Проведен обзор работ по теме исследования. В работах рассмотрен магнитопровод с топологией Мебиуса как элемент трансформатора. Для этого была разработана методика сравнительного анализа, подобрана необходимая измерительная аппаратура. По результатам исследования сделан вывод, что топология магнитопровода оказывает свое влияние на распространение магнитного поля в том случае, когда создаваемые магнитные поля невелики и сопоставимы с уровнем остаточной намагниченности, создаваемой доменной структурой материала магнитопровода. Проведена аналогия с миокардом сердца – как источником слабого магнитного поля и выдвинули гипотезу о том, что изменение магнитного поля сердца при его заболевании может быть связано с изменением топологии. На основании анализа известных данных из литературных источников и результатов моделирования на образцах имитаторах показано, что амплитудное значение магнитного поля здорового и больного сердца различаются.

Выполнено исследование амплитудных значений магнитного поля образцов анатомически-подобных моделей миокарда в зависимости от дополнительных магнитов. Проведены измерения и исследование амплитудных значений магнитного поля образцов анатомически-подобных моделей миокарда направлено на определение порогового значения амплитуды магнитного поля образцов с целью классификации нормальных и патологических состояний миокарда. Для сигналов с амплитудой от 2,22 мТл и более могут быть отнесены к сигналам с «патологией», сигналы с амплитудой от 0,66 и менее – могут быть отнесены к сигналам «норма». Диапазон (0.66; 2.22) мТл является областью недостоверной диагностики. Для сигналов, характеризующихся амплитудой в этих пределах, требуется проведение дополнительных исследований. Анализ результатов показал, что регистрации амплитудных значений магнитного поля достаточно для диагностики заболеваний сердца на ранней стадии.

Разработан классификатор на основе нейронной сети LSTM и программа автоматической диагностики состояний моделей миокарда. Для обучения искусственной нейронной сети использовался алгоритм обратного распространения ошибки. Подготовленные входные данные (промаркированы по классам N – норма и P – патология) подаются на входной слой нейронной сети, выходной слой которой диагностирует состояние модели как нормальное (здоров) или патология. Точность обучения классификатора составила 81%. Значит, разработанная нейросетевая модель может быть использована для автоматического определения состояния миокарда.

Результатом является пороговый критерий детектирования воспаления миокарда и программа для автоматической диагностики состояния миокарда.

Практическая значимость: исследование позволит ввести критерий «здорового сердца» на этапе ранней диагностики, что дает возможность повысить достоверность диагностики, т.к. оценку по формализованному показателю вести проще. На основе выявленного признака разработана программа автоматической диагностики миокарда.

Список литературы

1. Arutyunov Yu.A., Chashchin E.A., Mitrofanov A.A., Drobyazko A.A., Shashok P.A. The Development of the «Sleeping Gene» Type Biosensor as a Method to Increase the Efficiency of the Magnetocardiograph Performance // Proceedings. 2017; volume 1 issue 8 p. 728.
2. Арутюнов Ю.А. и др. Разработка методов функциональной диагностики повышенной эффективности на основе новых представлений об анатомии миокарда сердца / Ю.А. Арутюнов, И.Н. Возовиков, В.Н. Комаринцев, К.А. Стащук, Е.А. Чащин / Вестник аритмологии. 2018. № 5. С. 58.
3. Арутюнов Ю.А. и др. Применение 3D – технологий в биопринтинге миокарда сердца / Ю.А. Арутюнов, В.Н. Байбаков, Д.А. Кошкин, П.А. Шашок, Е.А. Чащин / Молодой ученый №28 (162), 2017, с. 33-36
4. Арутюнов Ю.А. и др. Бизнес планирования проекта по созданию и внедрению модели миокарда сердца с помощью 3D-принтера / Ю.А. Арутюнов, И.П. Архипов, В.Н. Байбаков, В.А. Глинских, А.А. Рудой, Е.А. Чащин / Ростовский научный журнал №1, 2018, с. 355-363
5. Marichev V., Arutyunov Y., Chashchin Ye. The formation of the new diagnostic indexes based on electro- and magnetocardiography in relation to cardiology of cardiac pathologies as part of the revelation of the myocardium with new anatomy and morphology // IEEE EUROCON 2019 -18th International Conference on Smart Technologies, Novi Sad, Serbia, 2019, pp. 1-4. doi: 10.1109/EUROCON.2019.8861867
6. Arutyunov Yu.A., Arutyunova E.Yu., Chashchin Ye.A. Models of work of the heart and cardiovascular system // European Journal of Natural History. 2019. № 4. p. 65-68.
7. Arutyunov Yu.A., Arutyunova E.Yu., Chashchin Ye.A. Propagation of electric potential on an undirected surface // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration” – Reports in English Sept. 28, 2019. Beijing, PRC p. 89-95.
8. Арутюнов Ю.А., Семенов И.А., Чащин Е.А. Разработка способа ранней диагностики сердечных патологий на основе новых представлений об магнитофизике миокарда // Нанoeлектроника, нанoфотоника и нелинейная физика. Сборник трудов XV Всероссийской конференции молодых ученых. Саратов, 2020. С. 11-12.
9. Арутюнов Ю.А., Арутюнова Е.Ю., Борщевская А.М., Чащин Е.А. Разработка тополого-физиологической модели электропроводящей системы сердца на основе новых представлений об анатомии и морфологии миокарда // Нанoeлектроника, нанoфотоника и нелинейная физика. Сборник трудов XV Всероссийской конференции молодых ученых. Саратов, 2020. С. 14-15.
10. Всемирная организация здравоохранения: Сердечно-сосудистые заболевания. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs317/ru> (дата обращения: 25.08.2017).
11. База данных аритмий Массачусетского технологического института: Описание. <http://ecg.mit.edu/> (дата обращения: 20.03.2017).
12. <https://nauchkor.ru/uploads/documents/5ea9c189ca23590001ca5097.pdf>