

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.  
ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра медицинской физики

**Метод регистрации и анализа пульсовой волны по спектру автодинного  
сигнала полупроводникового лазера с применением оконных функций**

АВТОРЕФЕРАТ

ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ БАКАЛАВРА

студента 4 курса 451 группы

направления 03.03.02 «Физика»  
код и наименование направления

факультета нано- и биомедицинских технологий  
наименование факультета

Чернецовой Ирины Алексеевны  
фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

к.ф.-м.н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

С.Ю. Добдин

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2020

## **Введение**

В настоящее время современные цифровые технологии позволяют проводить анализ сложных биологических сигналов в медицинской диагностике. Особое внимание в наши дни уделяется пульсовой диагностике в связи с большой информативностью пульсовой волны. Сигнал периферического пульса, в частности лучевой артерии, содержит в себе информацию о многих физиологических процессах, протекающих в сердечно-сосудистой системе, и отражает многие гемодинамические показатели сердечно-сосудистой системы: внутрисосудистое давление, напряжение артериальной стенки, волновые процессы в артериальной системе.

Нарушения формы и ритма импульсов кровяного давления являются индикаторами сердечно-сосудистых заболеваний (сердечная недостаточность, гиповолемия, анемия, брадикардия). Создание эффективного шумозащитного датчика, способного точно измерять форму пульса и интерпретация полученных результатов – трудоемкая задача. В настоящее время в кардиодиагностике преимущественно используются неинвазивные методы. Особое место среди них занимают исследования, основанные на регистрации пульсовых колебаний давления в сосудах.

### **Актуальность темы:**

Оценка состояния сосудистой системы бесконтактным методом, основанном на измерении формы пульсовой волны с помощью полупроводникового лазерного автодина.

### **Цель и задачи работы:**

Основной целью данной работы является разработка метода спектрального анализа автодинного сигнала полупроводникового лазера, позволяющего регистрировать форму пульсовой волны и диагностировать сердечно-сосудистую систему.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Провести критический анализ современных методов диагностики сердечно-сосудистой системы;
2. Разработать компьютерную программу для анализа формы пульсовой волны по спектру автодинного сигнала;
3. Разработать метод, позволяющий по спектру автодинного сигнала полупроводникового лазера регистрировать и анализировать форму пульсовой волны;
4. Провести экспериментальные исследования для реализации предлагаемого метода.

Теоретическая база исследований сформирована публикациями, которые посвящены темам исследования форм пульсовых волн, методам их восстановления и анализа.

Структура и объем работы: по своей структуре работа состоит из введения, сокращений, 4-х глав, заключения и списка используемых источников. Работа изложена на 45-х страницах машинописного текста, содержит 28 рисунков и список литературы из 21-го наименования.

## Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы и решаемых задач, а также формулируются цель и задачи исследования.

В первой главе описано строение сердечно-сосудистой системы, вводится понятие пульсовой волны, рассматриваются современные методы диагностики сердечно-сосудистой системы:

- Электрокардиограмма;
- ПЭТ/КТ;
- Эхокардиография;
- Сфигмография;
- Плетизмография.

Сердечно сосудистая система состоит из трёх основных звеньев – сердца, лимфы и сосудов. Сосуды сердца подразделяются на систему артерий, артериолы, капилляры, вены. Артериальный пульс вызывается волной повышенного давления, которая возникает в результате выбрасывания крови из сердца в аорту и распространяющейся по артериям при каждом сокращении сердца. Эта волна называется пульсовой волной.

Основным функциональным методом изучения состояния сердечно-сосудистой системы является электрокардиография. Полученная электрокардиограмма предоставляет сведения о нарушениях ритма сердца и позволяет контролировать, к примеру, лечение аритмии, разобраться в причинах боли в грудной клетке

Позитронно-эмиссионная томография, совмещенная с компьютерной томографией (ПЭТ/КТ) позволяет оценить метаболические и структурные изменения в определенных органах и тканях путем “гибридной визуализации”.

Эхокардиография (ЭхоКГ) – метод ультразвуковой диагностики, направленный на исследование морфологических и функциональных изменений сердца и его клапанного аппарата.

Сфигмография – неинвазивный механокардиографический метод, направленный на изучение колебаний артериальной стенки при прохождении пульсовой волны во время сердечного цикла. Синхронная запись сфигмограмм сонной, бедренной и лучевой артерий позволяет определить скорость распространения пульсовой волны.

Плетизмография – способ регистрации изменений объема тела или его части, связанных с динамикой кровенаполнения. *Фотоплетизмография* позволяет прогнозировать оптимальную дозу определенного воздействия (лекарственного препарата, холода, тепла и т. д.) и предупреждать отрицательные реакции в случае передозировки.

*Во второй главе* рассматривается устройство полупроводникового лазерного автодина, возможность снятия и анализа с его помощью сигналов, применение к измерению параметров движения биологических объектов.

Были рассмотрены схема, принцип работы полупроводникового лазера, возникновение автодинного эффекта.

Нормированная переменная составляющая автодинного сигнала при движении объекта представлялась в виде:

$$Z(t) = \cos(\theta - \frac{t}{\lambda_0})$$

где  $\theta$  — набег фазы автодинного сигнала,  $\lambda_0$  — длина волны лазерного излучения,  $t$  — интервал времени наблюдаемого автодинного сигнала,  $Z(t)$  — функция, описывающая продольные перемещения объекта.

Мощность автодинного сигнала представлялась в виде разложения в ряд по функциям Бесселя и был Фурье-спектр сигнала с помощью введенных выражений для амплитуд спектральных гармоник, соответствующие амплитудам спектральных составляющих разложения в ряд по функциям Бесселя.



Рисунок 1 – Спектр автодинного сигнала при амплитуде  $A_1=1$  мкм

С ростом амплитуды колебаний объекта на графике наблюдалось обогащение спектра протектированного сигнала; увеличивался номер спектральной составляющей с максимальной амплитудой  $S_{max}$ , а у гармоник младшего порядка – небольшое уменьшение. Для определения амплитуды нановибраций представлен следующий метод: необходимо рассчитать аргумент функции Бесселя первого рода  $\sigma$ , используя отношение второй к четвертой спектральных гармоник частотномодулированного автодинного сигнала при колебаниях отражателя

В ходе критического анализа выявлено несколько примеров работ с применением полупроводникового лазерного автодина для измерения параметров движения биологических объектов: измерение биовибраций в задачах кардиодиагностики; изучение механизма формирования выходного сигнала спекл-интерферометра для анализа вибраций поверхности кожи и биотканей; анализ амплитудно-частотной характеристики амплитуды колебаний барабанной перепонки при различных уровнях звукового воздействия.

Одним из примеров применения ППЛА стал разбор по определению скорости движения внешнего отражателя. Скорость движения внешнего отражателя можно найти, определив частоту переменной нормированной составляющей автодинного сигнала по ее спектру с использованием следующего выражения.

$$- \quad , \quad (2)$$

где  $\lambda_0$  – длина волны излучения лазерного диода без обратной связи.

Важным замечанием стало, что согласно выражению (2) с уменьшением скорости движения объекта частота переменной составляющей автодинного сигнала линейно уменьшается.

Также были приведены наиболее известные применения лазерного автодина для исследования параметров движений биологических объектов

являются: автодинная интерферометрия движений глазного яблока, измерение микросмещений лучевой артерии.

В третьей главе представлено компьютерное моделирование формы пульсовой волны по спектру автодинного сигнала. Для получения максимально эффективной информации для изучения ССС были применены оконные преобразования Фурье:

- 1) Окно Хэмминга или «Окно приподнятого косинуса». Уровень боковых лепестков: -42 дБ

$$) + 0.54, \quad (3)$$

- 2) Окно Блэкмана. Уровень боковых лепестков: -58 дБ ( $\alpha = 0.16$ ).

$$\text{---} \quad \text{---} , \quad (4)$$

при  $\alpha_0 = 0.5*(1 - \alpha)$ ;  $\alpha_1 = 0.5$ ;  $\alpha_2 = \alpha * 0.5$ ;

Была написана компьютерная программа для регистрации и анализа формы пульсовой волны по спектру автодинного сигнала.

В основу моделирования была положена работа сотрудников кафедры медицинской физики по определению формы пульсовой волны по спектру автодинного сигнала. В ней использовалось прямоугольное окно по всему сигналу  $P(t)$  и результатом являлся следующий график во времени (рис.2).

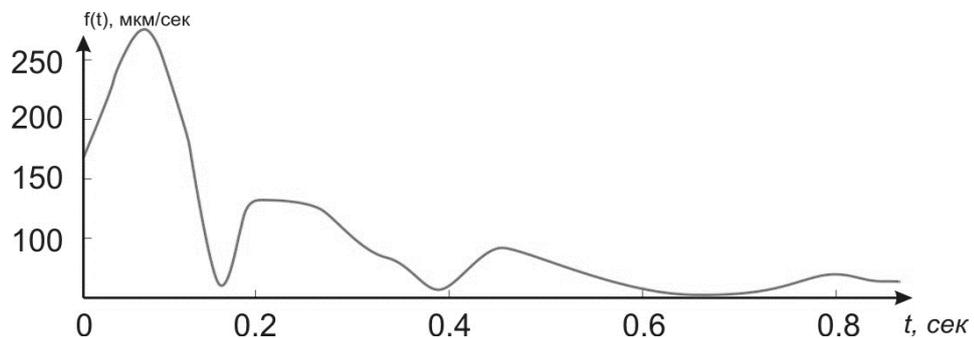
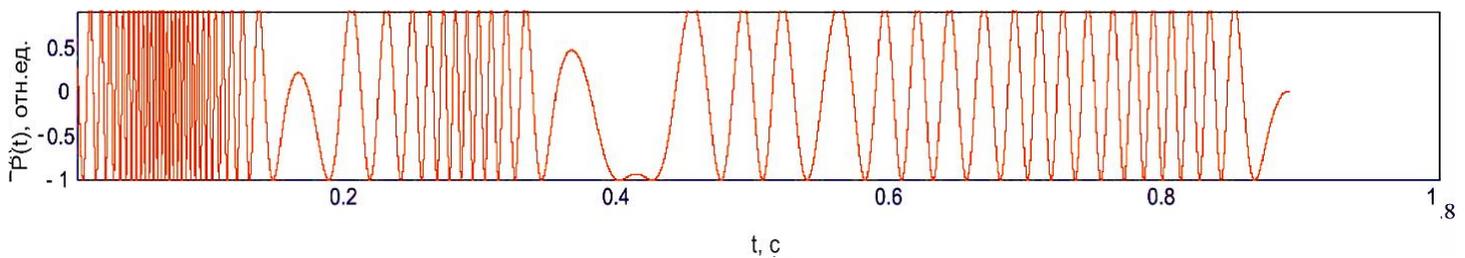


Рисунок 2 – График зависимости  $S_{\max}$  во времени

При компьютерном моделировании анализировались автодинные



сигналы  $P(t)$  по формуле (1), где  $Z(t)$  – данные сфигмограммы до и после окклюзионной пробы испытуемых из категории «спортсмены» и условно считающейся «норма».

Рисунок 20 – Смоделированный автодинный сигнал спортсмена до (а) и после (б) окклюзии

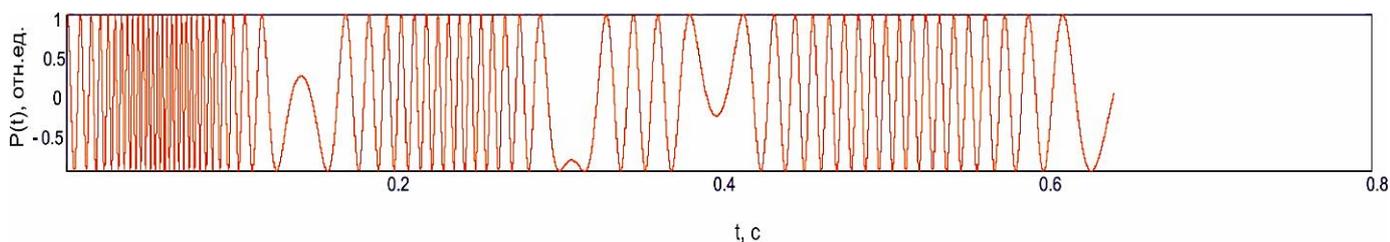
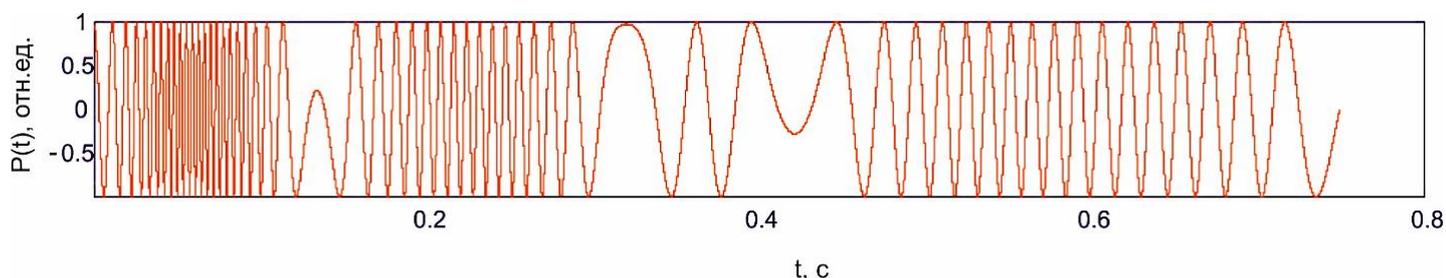


Рисунок 21 – Смоделированный автодинный сигнал нормы до (а) и после окклюзии (б)

С помощью системы MathCAD была написана компьютерная программа для регистрации и анализа формы пульсовой волны. Исходный код программы представляет собой алгоритм по заполнению некоторого массива. В него записываются максимальные скорости смещения стенки артерии в каждом обрабатываемом окне после оконных преобразований



Хэмминга (Блэкмана).

На рисунках 3, 4 представлены совместные графики, полученные в результате вычислений компьютерных программ с оконными преобразованиями функций Хэмминга и Блэкмана для спортсменов и нормы до и после окклюзионной пробы.

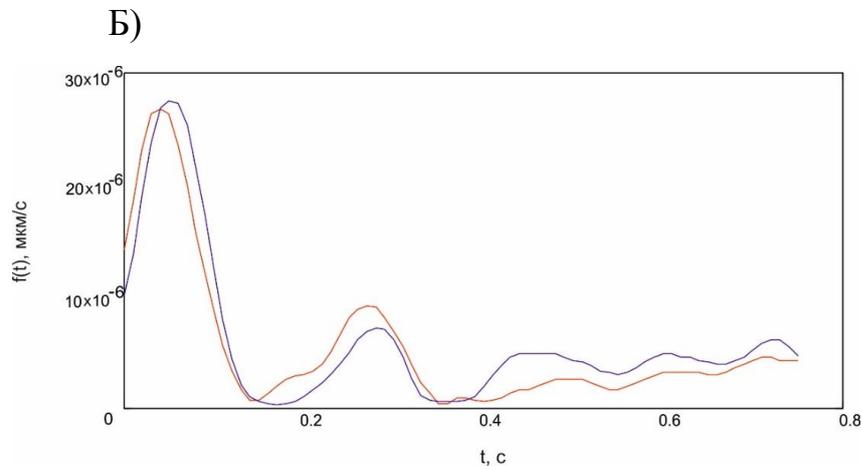
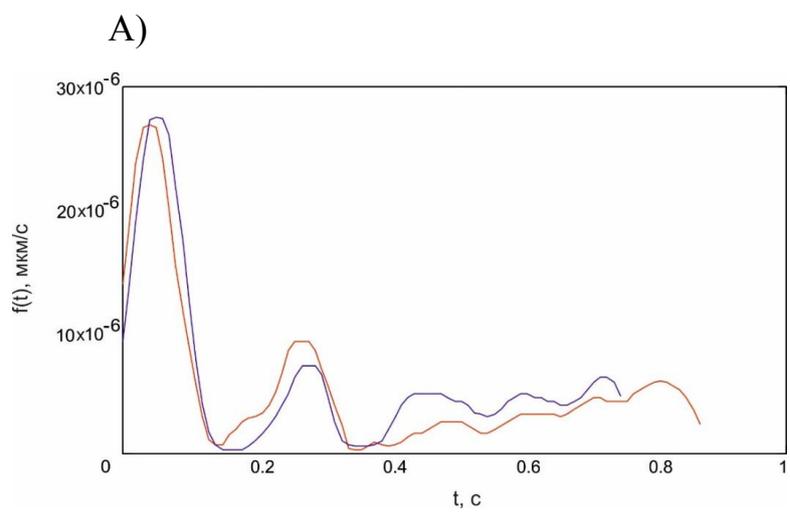
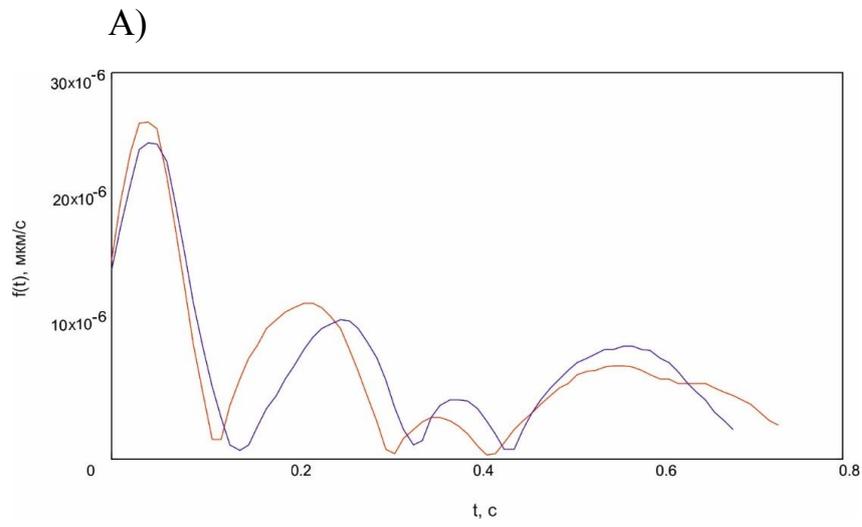


Рисунок 3 – График изменения максимальной скорости движения стенки артерии в каждом обрабатываемом окне во времени с применением оконных функций Хэмминга (а) и Блэкмана (б) для спортсмена до (красный) и после окклюзии (синий)



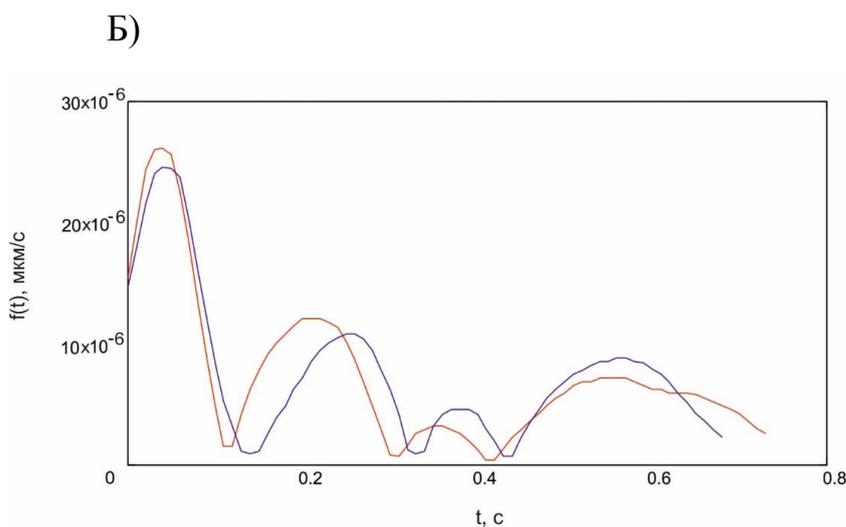


Рисунок 4 – График изменения максимальной скорости движения стенки артерии в каждом обрабатываемом окне во времени с применением оконных функций Хэмминга (а) и Блэкмана (б) для нормы до (красный) и после окклюзии (синий)

Проанализировав полученные графики, был сделан вывод, что представлена картина с нормальной физиологической реакцией на окклюзию артериальных сосудов, заключающаяся в увеличении артериального давления сразу после восстановления кровоснабжения верхней конечности обследуемого. После окклюзии наблюдается резкое увеличение амплитуды пульсовой волны вследствие ударного объема крови.

При построении модельных графиков с применением оконных функций Хэмминга и Блэкмана было отмечено, что оконное преобразование Блэкмана имеет лучшее амплитудное разрешение в сравнении с типом окна Хэмминга. Определяя оптимальную ширину обрабатываемого окна, в ходе работы было выявлено, что для корректной работы программы с оконным преобразованием Блэкмана требуется величина меньше, чем для Хэмминга, следовательно, будет обработано больше окон с одинаковым перекрытием, повысится точность построения результирующего графика.

Предложенная методика имеет более высокую чувствительность к изменениям формы пульсовой по сравнению с традиционными методами и может быть востребована для диагностики состояния сосудистой системы.

В четвертой главе приведены экспериментальные исследования для практической реализации предложенного метода. Метод регистрации и анализа формы пульсовой волны по спектру автодинного сигнала с применением оконных преобразований основывался на лазерной диагностике сигнала, снятого с лучевой артерии испытуемого в области запястья в состоянии покоя.

С помощью разработанной компьютерной программы, алгоритм работы которой приводился в главе 3, проводятся Фурье-преобразования с различными оконными функциями (Хэмминга и Блэкмана). По полученным данным строятся графики.

Для проведения экспериментальных исследований использовалась блок-схема, представленная на рисунке 5. С помощью ППЛА необходимо было направить излучение полупроводникового лазера на поверхность кожи в области запястья – место наиболее близкого расположения лучевой артерии к поверхности кожи. Часть отраженного излучения возвращалась в резонатор полупроводникового лазера; изменение выходной мощности регистрировалось встроенным в корпус лазера фотодетектором и поступал через усилитель на аналого-цифровой преобразователь, затем сохранялся в память ЭВМ для дальнейшей обработки.

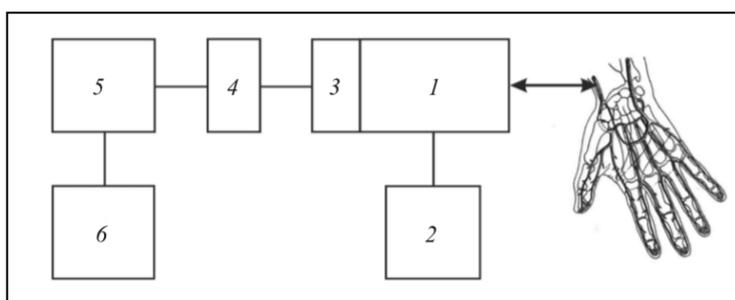


Рисунок 5 – Блок-схема экспериментальной установки: 1 – полупроводниковый лазер; 2 – стабилизатор источника тока; 3 – фотодетектор; 4 – усилитель; 5 – АЦП; 6 – ЭВМ

В ходе практической реализации метода по анализу спектра автодинного сигнала, снятого с лучевой артерии испытуемого, в программной среде MathCAD обрабатывался и представлялся представлен вид автодинного сигнала (рис. 6).

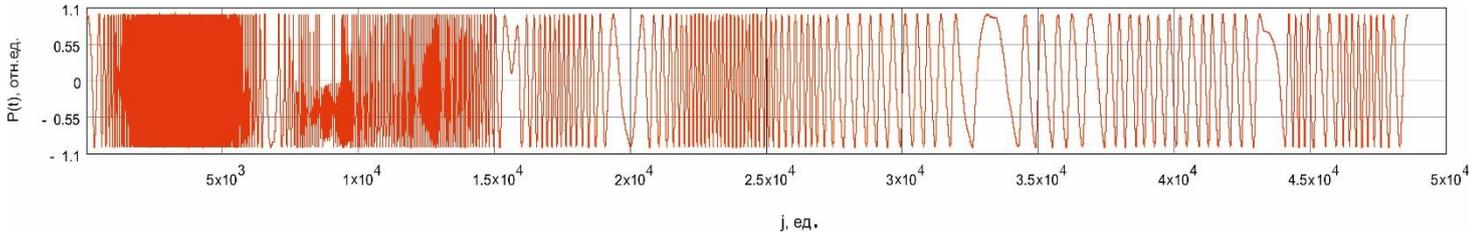
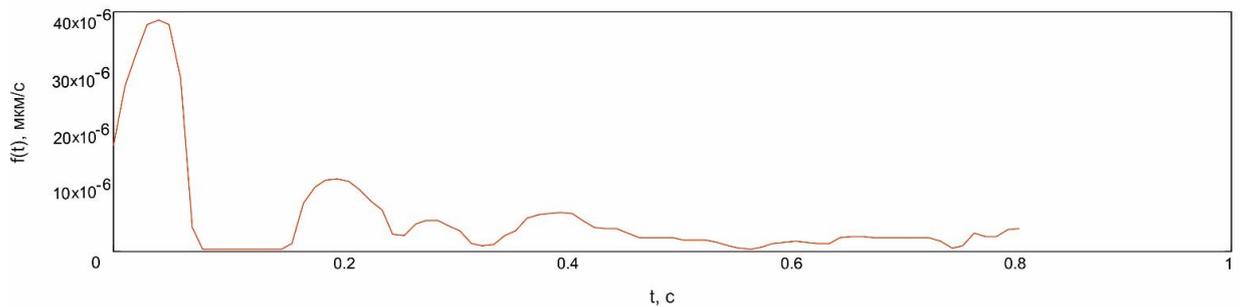


Рисунок 6 – График снятого экспериментально автодинного сигнала

Для корректной работы разработанной компьютерной программы проводился расчет следующих значимых величин: длина обрабатываемого сигнала, количество окон, сдвиг окна.

В результате работы компьютерной программы по обработке зарегистрированного сигнала строился Фурье-спектр: он представлен графиком зависимости изменения максимальной скорости смещения стенки артерии в каждом обрабатываемом окне во времени с применением оконного преобразования Хэмминга (рис. 7, а) и Блэкмана (рис. 7, б) соответственно, и их совместное представление (рис. 7, в).

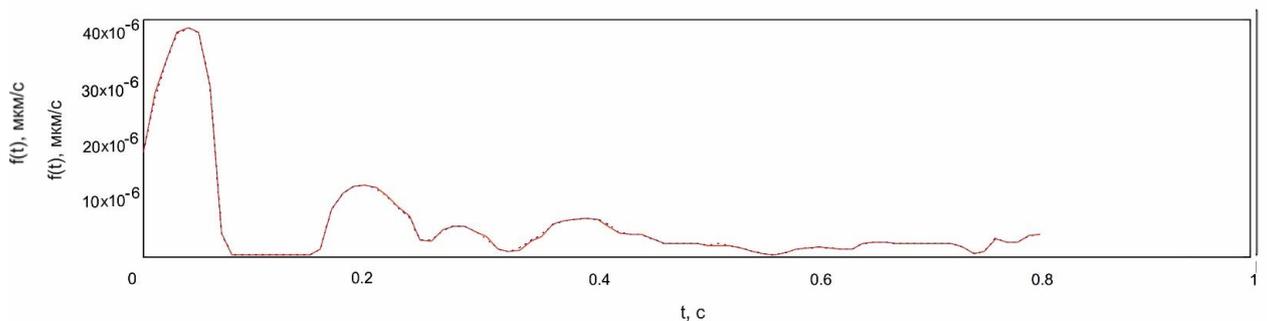
А)



Б)

В)

Рисунок 7 – Графики изменения максимальной скорости движения



стенки артерии в каждом обрабатываемом окне во времени:

- а) с применением оконного преобразования Хэмминга;
- б) с применением оконного преобразования Блэкмана;
- в) совместное изображение графиков а) и б)

В результате выполнения экспериментальной работы получена зарегистрированная форма пульсовой волны испытуемого, которая наглядно демонстрирует характерную динамику в состоянии покоя. Как следует из результатов, приведенных на рисунке 7, форма пульсовой волны отлична от результатов компьютерного моделирования, представленных на рисунках 3, 4 в покое. Это объясняется тем, что форма пульсовой волны индивидуальна для каждого испытуемого.

## **Заключение**

В ходе экспериментальной работы достигнута цель разработать метод спектрального анализа автодинного сигнала полупроводникового лазера, позволяющего регистрировать форму пульсовой волны и диагностировать состояние сердечно-сосудистой системы.

Разработанный метод имеет большую диагностическую значимость пульсового сигнала лучевой артерии при диагностике состояния ССС; он не требует вмешательства в организм человека, не травматичен, не имеет противопоказаний.