

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.
ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

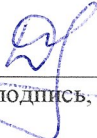
Кафедра физики твёрдого тела

МАГИСТЕРСКАЯ РАБОТА

**«МЕТОД АНАЛИЗА АВТОДИННОГО СИГНАЛА
ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА, ПОЛУЧЕННОГО ПРИ
ОТРАЖЕНИИ ОТ СТЕНКИ КРОВЕНОСНОГО СОСУДА»**

студента 2 курса 2251 группы
по направлению 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»
Института физики
Хрипунова Аркадия Сергеевича

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н.		20.06.2023	С.Ю. Добдин
должность, уч. степень, уч. звание	подпись, дата		инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-м.н.		А.В. Скрипаль
должность, уч. степень, уч. звание	подпись, дата	инициалы, фамилия

Саратов 2023

Введение. В настоящее время заболевания сердечно-сосудистой системы являются причиной высокой смертности среди населения по всему миру. К одному из приоритетных направлений своевременной диагностики таких заболеваний относится развитие новых методов неинвазивной диагностики. Актуальным является развитие лазерных методов, измерение параметров кровотока которыми осуществляется бесконтактно. Одна из технологий миниатюризации измерительных сенсоров основана на использовании высокоточного лазерного диода с обратной связью. Преимуществом подобных систем является возможность проведения измерений в микро- и нанометровом диапазоне. Для анализа зарегистрированного сигнала, полученного при регистрации кровотока, могут быть использованы методы частотного анализа.

Данная магистерская работа посвящена изучению и анализу существующих методов измерения микро- и наносмещений объекта, основанных на использовании лазера, проведению компьютерного моделирования, а также проведению экспериментального исследования по регистрации пульсовой волны с помощью полупроводникового лазерного автодина.

Цели и задачи работы

Цель исследования – разработать метод анализа автодинного сигнала, позволяющего по Фурье-спектру определять параметры движений стенки кровеносного сосуда человека.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

Поставленные задачи:

- Провести критический анализ методов определения параметров движения объекта при микро- и наносмещениях.
- Реализовать компьютерную модель автодинного сигнала, полученного при отражении от стенки кровеносного сосуда в норме и при патологии.

- Провести компьютерное моделирование, позволяющее по сигналу полупроводникового лазерного автодина определять параметры движения сосудистой стенки.
- Выполнить экспериментальные исследования по регистрации пульсовой волны с помощью полупроводникового лазерного автодина.

Магистерская работа содержит 6 глав:

1. Устройство лазеров

1.1 Принцип действия лазеров

1.2 Конструкция лазеров

1.3 Активные среды лазеров

1.4 Источник накачки

1.5 Оптический резонатор

1.6 Типы лазеров

1.7 Полупроводниковый лазер

2. Методы определения параметров движения

2.1 Лазерная интерферометрия

2.2 Гомодинный метод

2.3 Гетеродинный метод

2.4 Полупроводниковый лазерный автодин

2.5 Методика измерения нано- и микросмещений с помощью полупроводникового лазерного автодина

2.6 Лазерные доплеровские методы

2.7 Голографический метод

2.8 Спекл-интерферометрический метод

3. Компьютерное моделирование

4. Разработка лабораторного образца на основе лазерного автодина для диагностики сердечно-сосудистой системы

4.1 Проектирование схемы питания лазерного автодина

4.2 Изготовление контроллера питания лазерного автодина

5. Описание методики измерений

6. Экспериментальное исследование

Основное содержание

Первый раздел описываются принцип действия лазера, конструкция лазеров и их типы.

Второй раздел посвящен рассмотрению таких методов определения микро- и наносмещений как: измерения нано- и микросмещений с помощью полупроводникового лазерного автодина, метод лазерной интерферометрии, гомодинный, гетеродинный, лазерный доплеровский, голографический, автодинный метод, спекл-интерферометрический метод, а также критическому анализу этих методов.

В третьем разделе описывается компьютерное моделирование, которое позволило реализовать модель автодинного сигнала полупроводникового лазера, полученного при отражении от стенки кровеносного сосуда в норме и при патологии. Для анализа сигнала используется оконное преобразование Фурье. Далее будет рассмотрено моделирование 4-ёх типов пульсовой волны.

Моделирование автодинного сигнала выполнялось для пульсовой волны приведенной в статье А.С. Парфенова “Экспресс-диагностика сердечно-сосудистых заболеваний” с лучевой артерии сглаженной функцией Гаусса с коэффициентом 0.05 (рисунок 1). В его работе было обнаружено при проведении контурного анализа пульсовой волны объёма с расчётом временного параметра и амплитудного параметра (индекса отражения) несколько типов кривых. Их классификации заключается в различных формах пульсовых волн. А это различие зависит от временного интервала между двумя компонентами пульсовой волны: прямой и отражённой волной. По типу пульсовой волны можно косвенно судить об эластичности стенок артерий, а также имеются ли различные патологии.

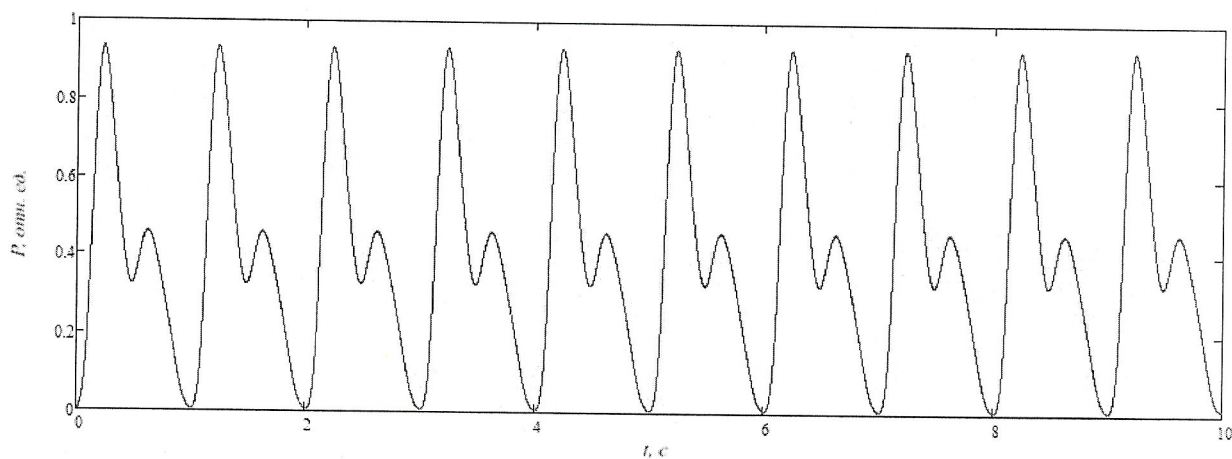


Рисунок 1. Исходный тип кривой пульсовой волны

Следующим этапом в работе было моделирование автодинного сигнала в программе Visual Studio Code на языке python с использованием библиотек NumPy, Pandas, Matplotlib. Полученная модель автодинного сигнала для исходного типа пульсовой кривой представлено на рисунке 2:

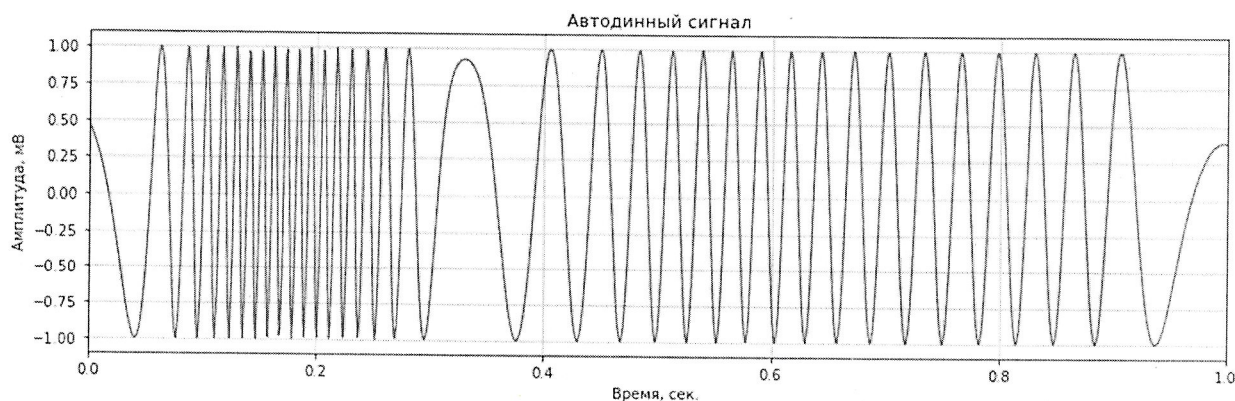


Рисунок 2. Автодинный сигнал исходного типа волн

Далее была выполнена предварительная обработка автодинного сигнала с использованием фильтра Баттерворта с заданным значением коэффициента фильтрации $k=0.08$. После фильтрации были использованы алгоритмы оконного преобразования Фурье (ширина окна составляла 400 точек, кол-во окон 500, глубина перекрытия 9.5%). На рисунке 3 приведены графики зависимости скорости движения от времени для 4-ёх автодинных сигналов.

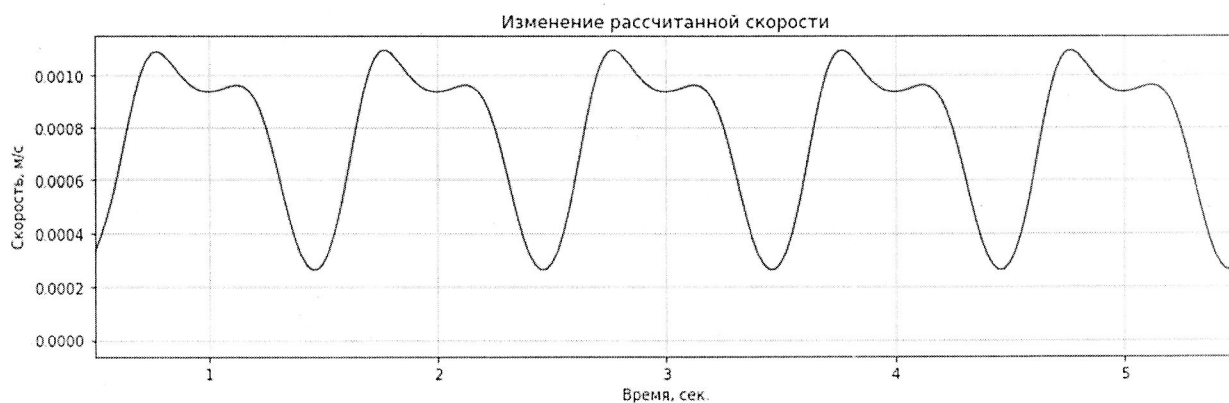


Рисунок 3. График зависимости скорости от времени для исходного типа пульсовой кривой

Таблица 1. – Результаты определения скорости для 4-ех типов волн V_{max} , V_{min}

№	V_{max} м/с	V_{min} м/с
1	$0,11 \cdot 10^{-2}$	$0,28 \cdot 10^{-3}$
2	$0,1 \cdot 10^{-2}$	$0,27 \cdot 10^{-3}$
3	$0,17 \cdot 10^{-2}$	$0,3 \cdot 10^{-3}$
4	$0,13 \cdot 10^{-2}$	$0,23 \cdot 10^{-3}$

Полученные результаты компьютерного моделирования показывают возможность применения алгоритма решения для определения скорости смещения внешнего отражателя по автодинному сигналу с высокой точностью.

В четвертом разделе описывается разработка лабораторного образца на основе лазерного автодина для диагностики сердечно-сосудистой системы.

Для экспериментального исследования необходимо было разработать лабораторный образец лазерного автодина, позволяющего проводить изменения нано- и микрометровых смещений. Отличие предлагаемого решения от уже существующих аналогов заключается в принципиально иной схеме питания лазерного диода и фотодиода. Аналогичные схемы питания используют подход,

при котором питание лазерного диода было стабилизировано специальным драйвером питания. При разработке нового образца было принято решение отказаться от драйвера питания и использовать каскад стабилизаторов напряжения.

В пятом разделе посвящен описанию методики измерений

Следующим этапом дипломной работы было измерение пульсовой волны отраженной от стенки кровеносного сосуда с помощью полупроводникового лазерного автодина. По полученному типу пульсовой волны можно косвенно судить об эластичности стенок артерий, а также имеются ли различные патологии.

На рисунке 4 представлена схема лазерной автодинной экспериментальной установки. При измерениях использовался лазерный диод – 1 со встроенным фотодетектором – 3 разработанный в предыдущем разделе имеющий следующие характеристики: мощность излучения 5мВт, длина волны излучения 650 нм. Излучение полупроводникового лазера, стабилизированного источником тока – 2, направлялось на поверхность кожи. Отраженное от поверхности кожи излучение возвращалось в резонатор полупроводникового лазера. Изменение мощности излучения регистрировалось встроенным в лазерный диод фотодетектором. Сигнал с фотодетектора поступал через усилитель сигнала – 4 и полосовой фильтр – 5 на АЦП – 6. Цифровой сигнал с АЦП для последующего анализа сигнала сохранялся в памяти ПК – 7.

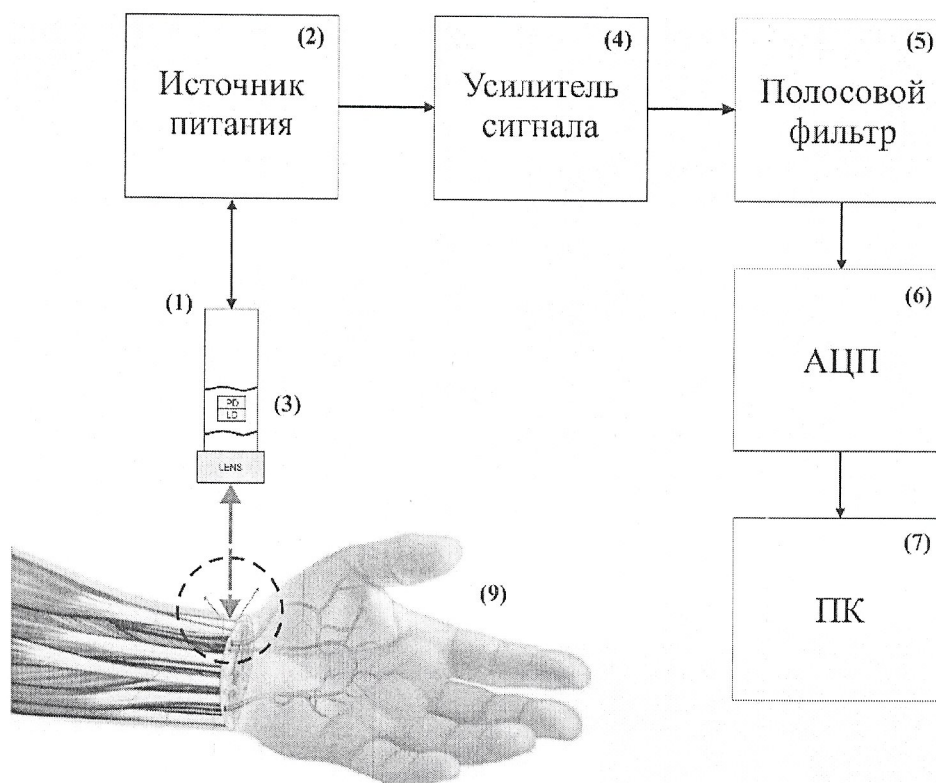


Рисунок 4. Схема экспериментальной установки

Для проведения экспериментальных лабораторных исследований был проведен ряд экспериментальных исследований. Методика исследований состоит из следующих этапов:

1. Сборка стенда для регистрации отражённого излучения от поверхности сосуда человека. Для этого был использован универсальный измерительный модуль станции NIELVIS.

2. Подготовка измерительного модуля (лазерный автодин). Этап реализуется с использованием разработанного контроллера. Измерительная часть лазерного модуля фиксируется с помощью специальной оснастки фирмы STANDA.

3. Подготовка добровольца. Все измерения проводились в области предплечья верхних конечностей человека. В зону облучения не попадали участки с волосяным покровом и иными кожными образованиями, поскольку это могло дополнительно вносить погрешность в проводимые измерения.

4. Регистрация измеренного сигнала осуществляется через DAQ MX устройство лабораторной станции NIELVIS. Устройство используется в качестве АЦП.

5. Зарегистрированный сигнал после сохранения в цифровом виде сохраняется в памяти ЭВМ, где будет выполнена последующая обработка сигнала и его подробный анализ.

6. В программе на компьютере рассчитывается уровень обратной связи для конкретного измерения.

В шестом разделе описываются экспериментальные исследования, которые позволили реализовать модель автодинного сигнала полупроводникового лазера, полученного при отражении от стенки кровеносного сосуда человека. Для анализа сигнала используется оконное преобразование Фурье.

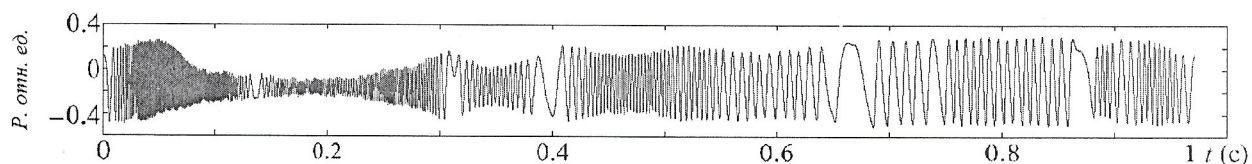


Рисунок 5. Исходный тип кривой пульсовой волны

Следующим этапом в работе было моделирование автодинного сигнала в программе Visual Studio Code на языке python с использованием библиотек NumPy, Pandas, Matplotlib. Полученная модель автодинного сигнала для пульсовой кривой представлена на рисунке 6:

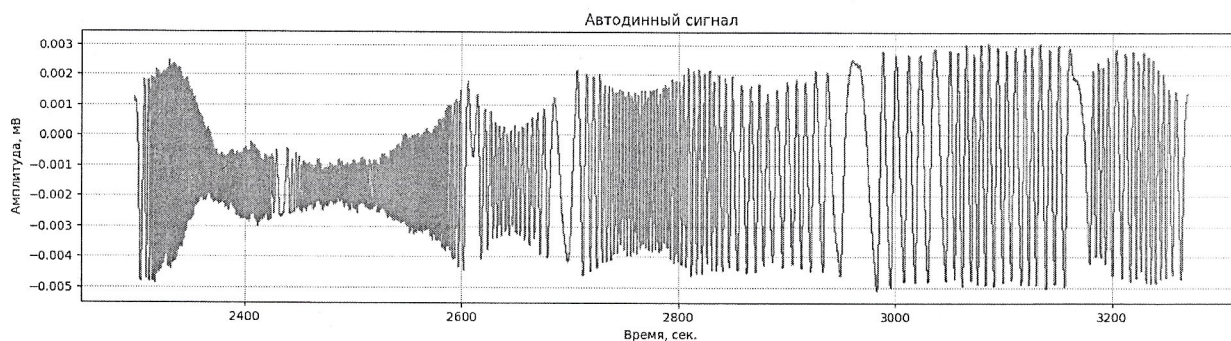


Рисунок 6. Автодинный сигнал пульсовой волны

Далее была выполнена предварительная обработка автодинного сигнала с использованием фильтра Баттерворта и функции Ханна с заданным значением коэффициента фильтрации $k=0.08$. Данная обработка позволила наиболее точно оценить зарегистрированную пульсовую волну. После фильтрации были использованы алгоритмы оконного преобразования Фурье (ширина окна составляла 400 точек, кол-во окон 500, глубина перекрытия 9.5%). На рис. 7-10 приведены графики зависимости номера гармоники $N_{\max}$ от времени для автодинных сигналов пульсовой волны.



Рисунок 7. Применение фильтра Баттерворта и функции Ханна для автодинного сигнала

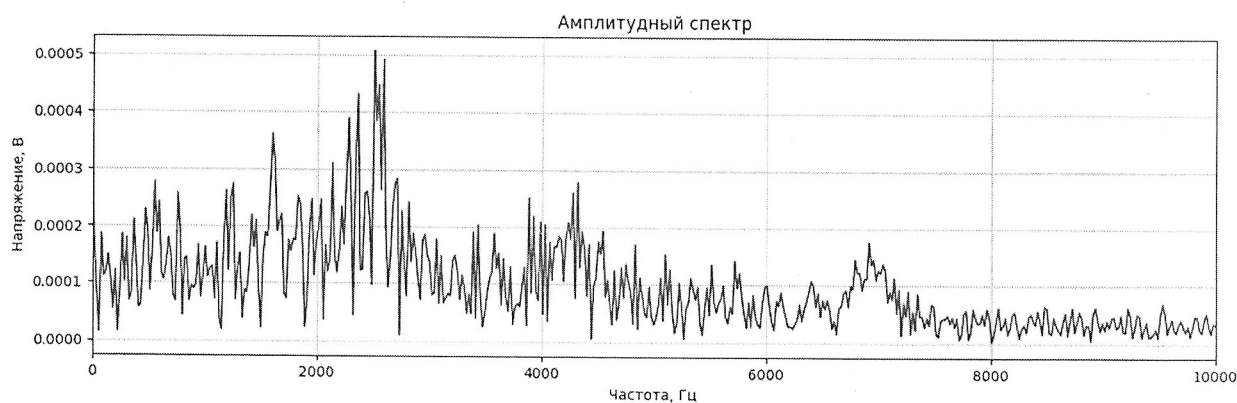


Рисунок 8. Фурье-спектр автодинного сигнала

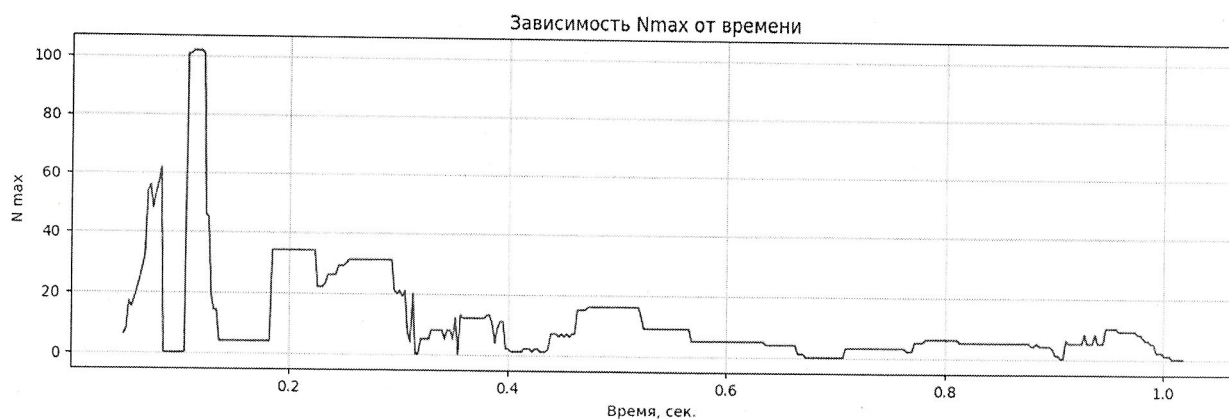


Рисунок 9. График зависимости номера гармоники от времени для пульсовой кривой

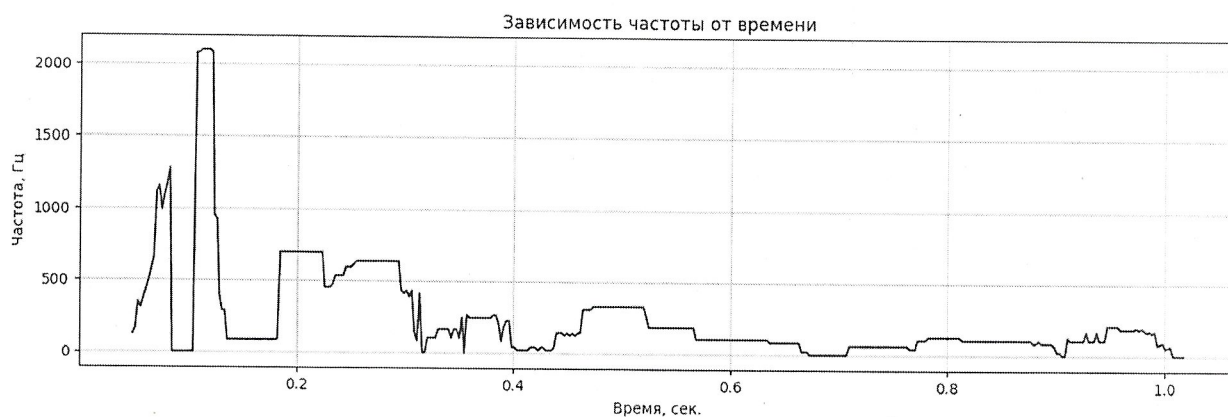


Рисунок 10. График зависимости номера гармоники от времени для пульсовой кривой

На рисунке 11 приведен график зависимости скорости движения от времени для автодинного сигнала. Для удобства анализа величин, график зависимости автодинного сигнала был разбит на 4 участка.

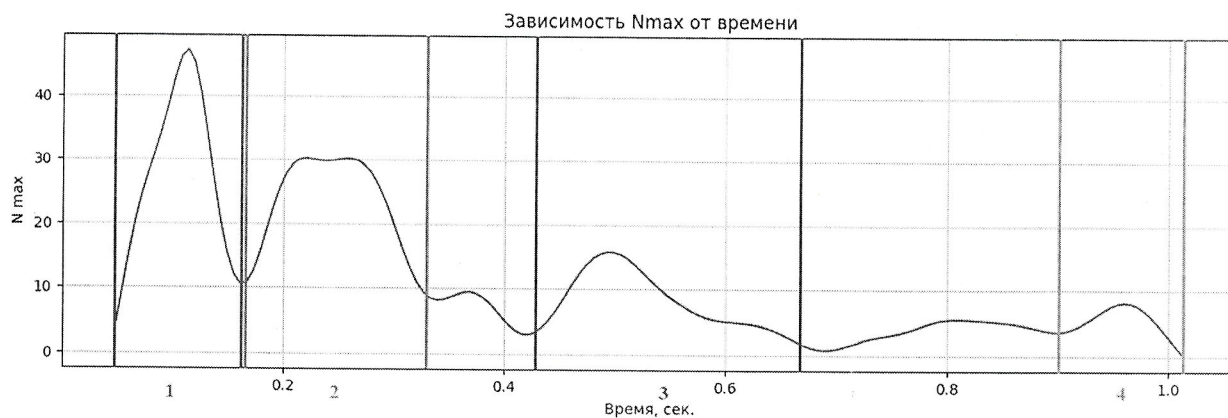


Рисунок 11. График зависимости скорости от времени для пульсовой кривой

Ниже представлены результаты по определению максимальной скорости, времени и пройденного расстояния внешнего отражателя:

Таблица 2. – Результаты определения максимальной скорости V_{max} , времени t , и пройденного расстояния S_{win}

Участок	Время, t	Скорость, V_{max}	Смещение, S_{win}
1	0,05 сек	$0,15 \cdot 10^{-4}$ м/с	$0,75 \cdot 10^{-6}$ м
2	0,11 сек	$0,1 \cdot 10^{-4}$ м/с	$0,11 \cdot 10^{-5}$ м
3	0,07 сек	$0,5 \cdot 10^{-5}$ м/с	$0,35 \cdot 10^{-6}$ м
4	0,06 сек	$0,3 \cdot 10^{-5}$ м/с	$0,18 \cdot 10^{-6}$ м

В результате проведенного экспериментального исследования были рассчитаны значения скорости смещения сосудистой стенки. Максимальное значение скорости $0,15 \cdot 10^{-4}$ м/с и минимальное $0,3 \cdot 10^{-5}$ м/с.

Полученные результаты экспериментального исследования показывают возможность применения алгоритма решения по определению параметров смещения внешнего отражателя с помощью полупроводникового лазерного автодина с высокой точностью.

Заключение

В ходе выполнения магистерской работы были получены следующие результаты:

1. Проведен критический анализ методов определения параметров движения объекта при микро- и наносмещениях.
2. Реализована компьютерная модель автодинного сигнала, полученного при отражении от стенки кровеносного сосуда в норме и при патологии.
3. Проведено компьютерное моделирование, позволяющее по сигналу полупроводникового лазерного автодина определять параметры движения сосудистой стенки.
4. Выполнены экспериментальные исследования по регистрации пульсовой волны с помощью полупроводникового лазерного автодина

Таким образом в работе была показана возможность использования полупроводникового лазерного автодина для определения параметров движения объекта.

