

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твёрдого тела

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУДЫ ВИБРАЦИЙ ОТРАЖАТЕЛЯ С
ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО АВТОДИНА И АЛГОРИТМОВ
МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ»

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЫ

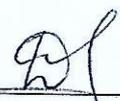
Студента 4 курса 4051 группы
Направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»
Института физики

Гадетского Никиты Ильича

Научный руководитель:

к.ф.-м.н., доцент

должность, ученая степень, ученое звание



подпись, дата

С. Ю. Добдин

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой физики твёрдого
тела:

д.ф.-м.н., профессор

должность, ученая степень, ученое звание



подпись, дата

Ал. В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2024 год

Введение

Данная работа посвящена изучению и анализу существующих методов измерения нановибраций, основанных на использовании лазера, разработке метода анализа лазерного интерференционного сигнала при помощи алгоритмов машинного обучения, а также проведению эксперимента по измерению нановибраций с использованием автодинной установки с последующей обработкой результатов для поиска амплитуды колебаний.

Развитие современных технологий требует непрерывного контроля над различными параметрами, что обуславливает востребованность бесконтактных методов измерения, так как возникают ситуации, когда контактные методы невозможны или не подходят ввиду различных причин. Среди бесконтактных методов особое место занимает так называемая “самосмешивающаяся лазерная интерферометрия”.

Это интерферометрический метод, при котором часть света, отраженного вибрирующей мишенью, отражается в лазерный резонатор, вызывая модуляцию как по амплитуде, так и по частоте излучаемого оптического луча. Таким образом, лазер становится чувствительным к расстоянию, пройденному отраженным лучом, становясь датчиком расстояния, скорости или вибрации.

Возможность точного определения смещения исследуемого объекта, а также параметров его вибрации привело к широкому распространению в сфере медицины и производства. Однако данный метод не лишён недостатков, а именно – достаточно “громоздкие” вычисления, которые необходимо проводить для точного определения параметров исследования объекта.

Цель работы: разработать метод регистрации и анализа лазерного интерференционного сигнала, основанный на алгоритмах машинного обучения.

Поставленные задачи:

- Провести критический анализ методов определения параметров микро- и нановибраций.

- Провести компьютерное моделирование, собрать базу данных для обучения алгоритмов. Проанализировать результаты.
- Экспериментально определить амплитуды вибраций внешнего отражателя, используя полупроводниковый лазерный автодин и алгоритмы машинного обучения.

Работа занимает 50 страниц и включает в себя 16 рисунков, список использованных источников, состоящий из 22 наименований.

Основное содержание работы

Во введении рассматривается актуальность работы, определяется цель и задачи исследования.

Первая глава посвящена рассмотрению принципа работы лазеров, их конструкции, активные среды лазеров, источник накачки, оптический резонатор и известные типы лазеров.

Рисунок 1 – а – поглощение энергии, б – спонтанное излучение, с – вынужденное излучение.

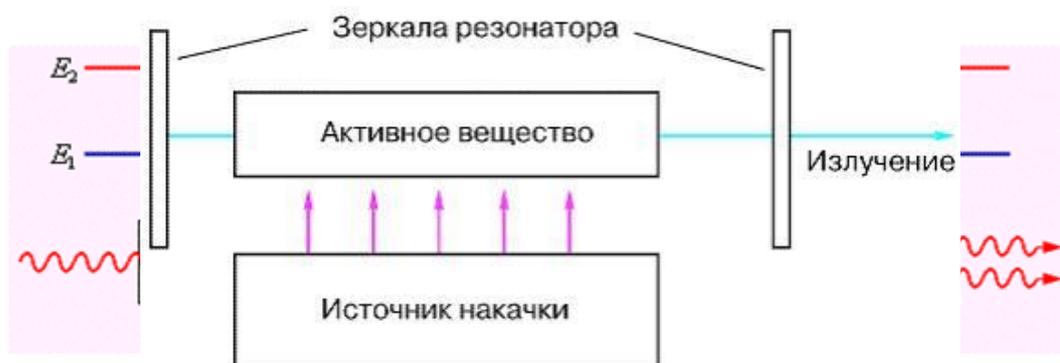


Рисунок 2 – Общая конструкция лазеров.

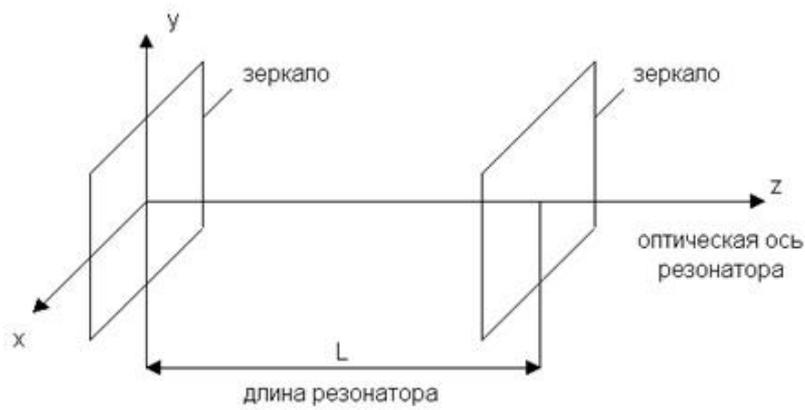


Рисунок 3 – Конструкция резонатора Фабри – Перо.

Во второй главе были рассмотрены некоторые известные методы измерения нановибраций которые в свою очередь подразделяются на контактные и бесконтактные. Принципиальная разница состоит в наличии (или отсутствии) механической связи датчика с объектом исследования.

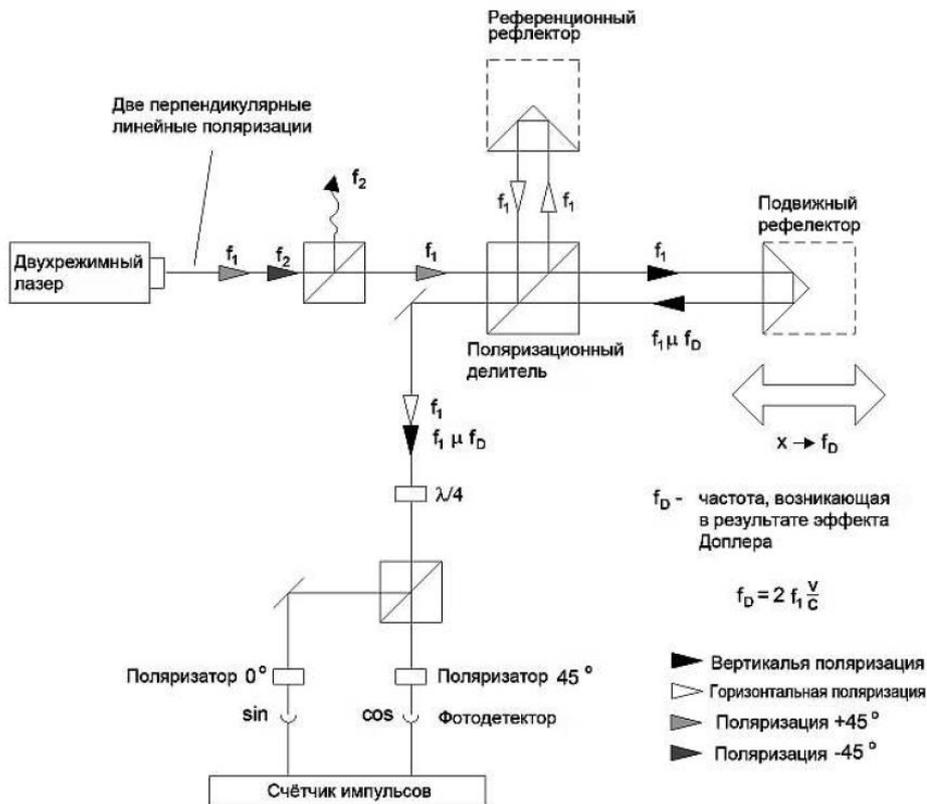


Рисунок 4 –Блок схема работы гомодинного интерферометра.

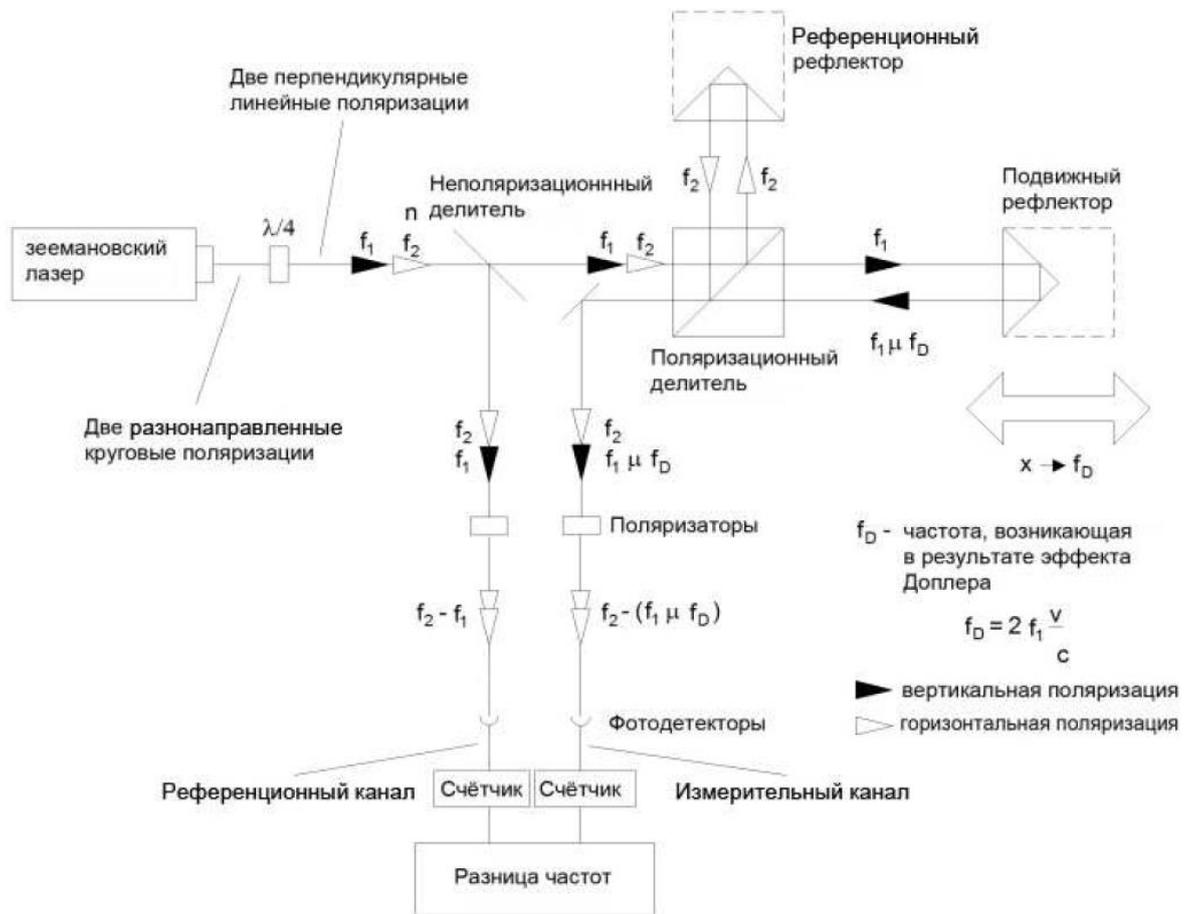


Рисунок 5 –Блок схема гетеродинного интерферометра.

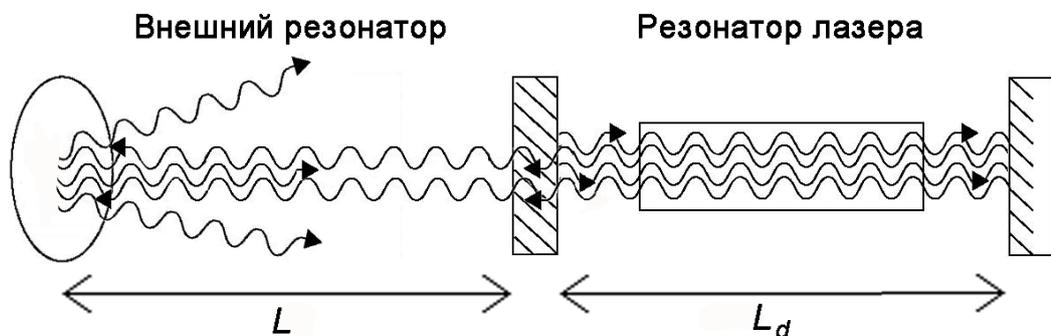


Рисунок 6 –Модель составного резонатора полупроводникового лазера.

Где: L – длина внешнего резонатора, L_d – длина резонатора полупроводникового лазера.

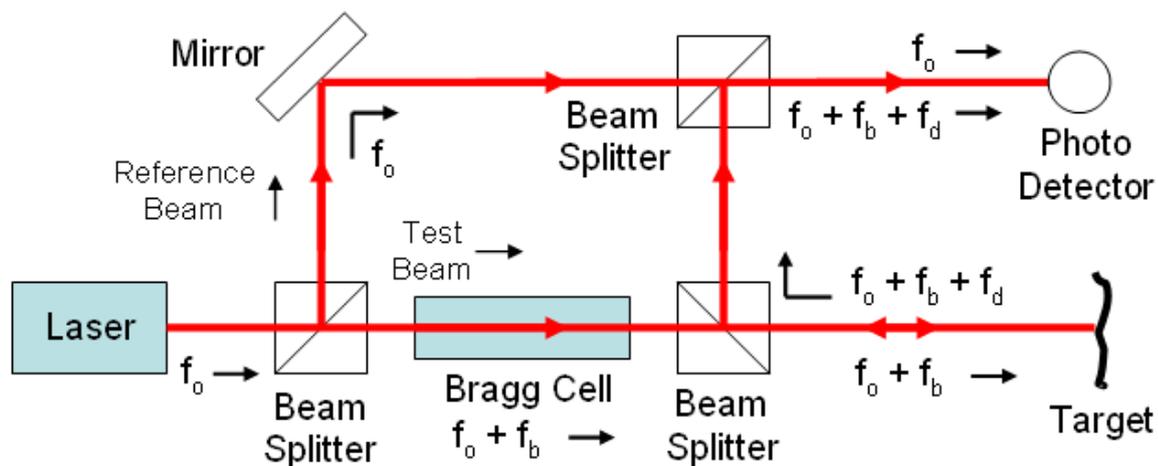


Рисунок 7 – Основные компоненты лазерного доплеровского вибрметра.

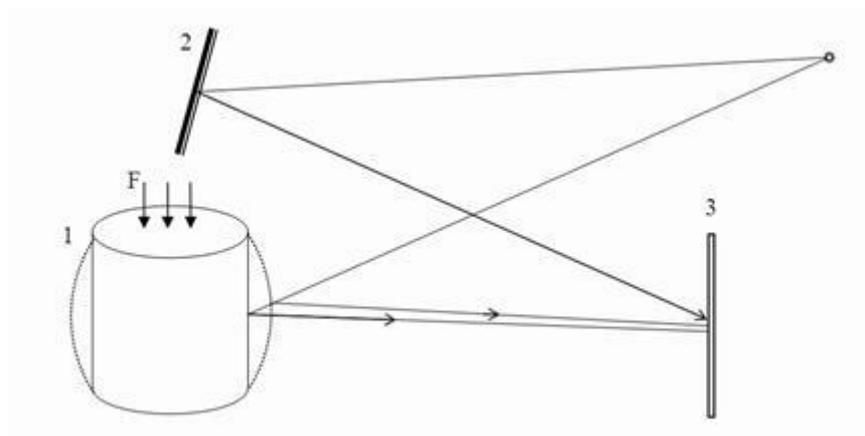


Рисунок 8 – Оптическая схема метода двух экспозиций: 1 – исследуемый предмет 2 – зеркало, 3 – голограмма.

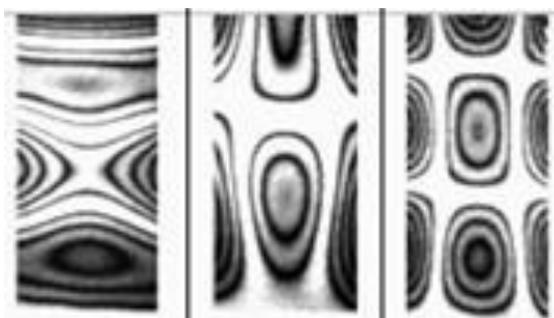


Рисунок 9 – Голографические интерферограммы.

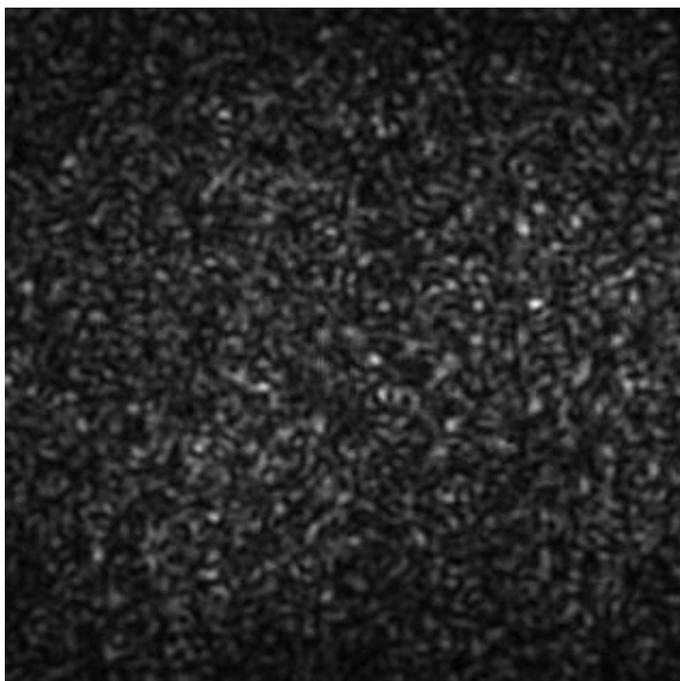


Рисунок 10 –Пример спекл картины.

В третьей главе были рассмотрены алгоритмы машинного обучения.

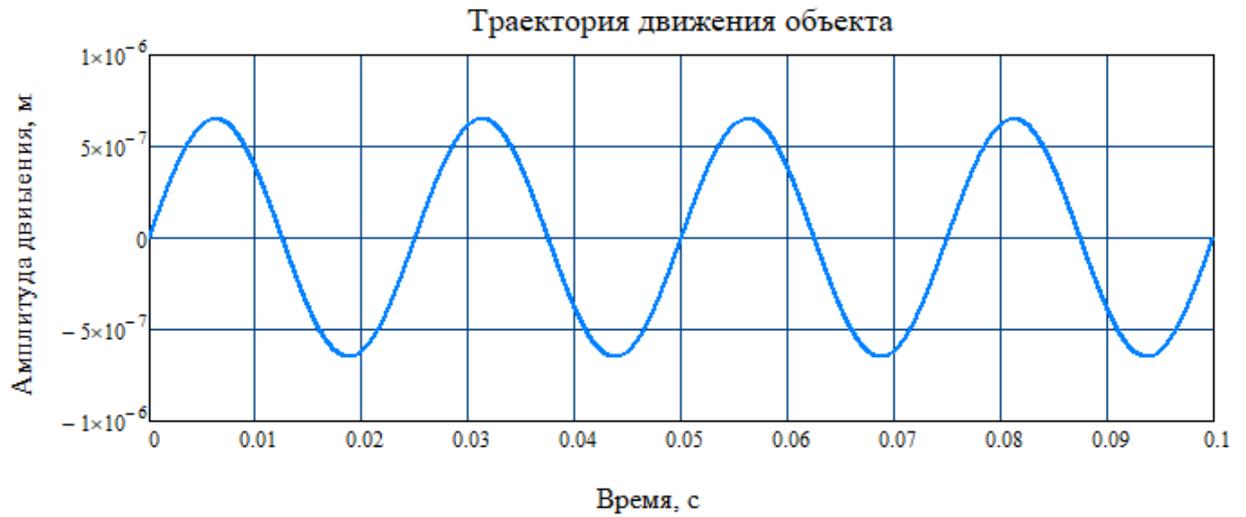
Для анализа наборов данных с целью поиска в них смысла или системности применяются алгоритмы машинного обучения. Общей чертой таким алгоритмов является не прямое решение задачи, что достигается путём предварительного обучения на шаблонах и примерах, что позволяет решать не одну конкретную задачу, а целую группу, при условии их сходства.

В четвертой главе было проведено компьютерное моделирование с целью получить значения пяти гармоник спектра автодинного сигнала, последней пиковой и двух соседних к ней с двух сторон.

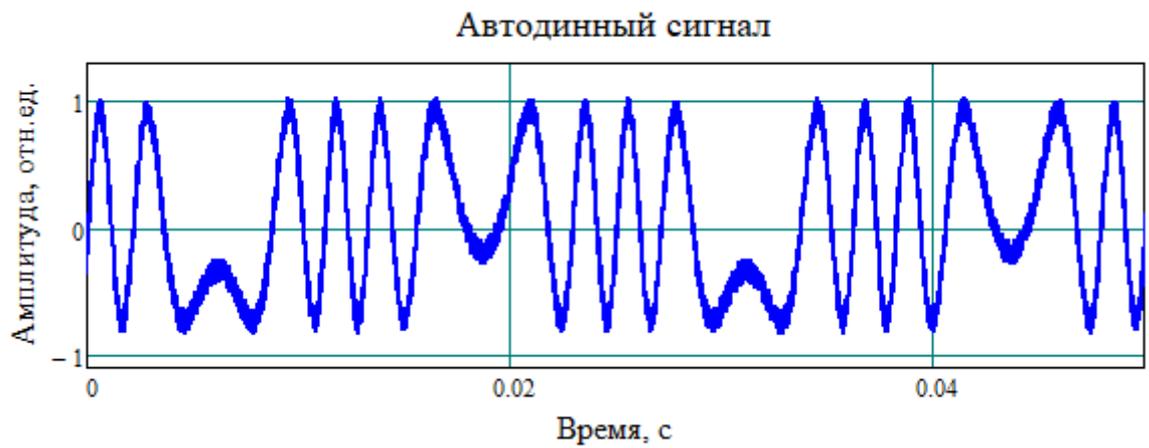
С полученного сигнала строился спектр с помощью преобразования Фурье. Находилась последняя пиковую гармонику. Записывалось её значение, а также значения двух гармоник с правой стороны от пиковой и двух гармоник слева. Данные манипуляции проводились при различных значениях амплитуды колебаний внешнего отражателя. Из полученных значений, а также значения амплитуды составлялась база данных.

При компьютерном моделировании сигнала полупроводникового лазерного автодина были использованный следующие параметры: длина

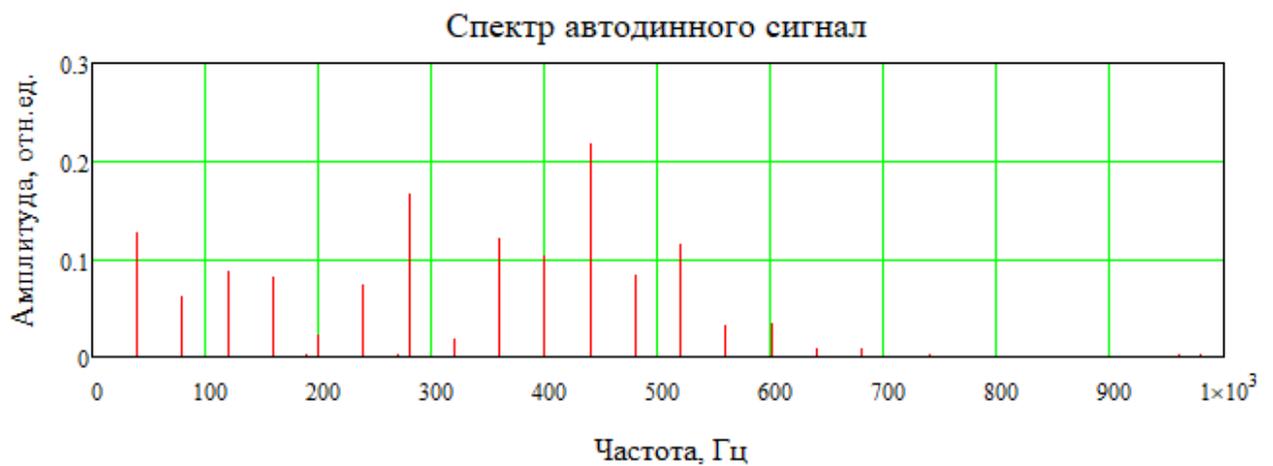
волны излучения полупроводникового лазера составила $\lambda = 655$ нм, а частота колебаний внешнего отражателя $\nu = 40$ Гц.



а)



б)



в)

Рисунок 11 – Колебания объекта (а), смоделированный автодинный сигнал (б) и его спектр (в).

	sn-2	sn-1	sn	sn+1	sn+2	amp
0	0.1295	0.000442	0.3588	0.000484	0.1243	3.1e-007
1	0.1132	0.181700	0.3107	0.120500	0.1073	3.1e-007
2	0.1639	0.092640	0.2578	0.254700	0.1695	3.1e-007
3	0.2326	0.000366	0.3634	0.000518	0.2398	3.1e-007
4	0.1306	0.000146	0.3583	0.000368	0.1250	3.1e-007

Рисунок 12 – База данных, где sn – значение пиковой гармоники, sn-2, sn-1, sn+1, sn+2 – значение соседних гармоник, amp – значение амплитуды.

Также было принято решение обучить несколько алгоритмов и сравнить их эффективность с помощью метрики R^2 , которая представляет собой коэффициент детерминации. Эта метрика представляет собой разницу в дисперсии предсказательной модели и дисперсии реальных величин. Значение данной метрики стремится к единице и чем оно к ней ближе, тем более вероятно, что модель хорошо предсказывает реальные величины.

Использованные алгоритмы:

1. Модель линейной регрессии
2. Модель дерева решений;
3. Модель случайного леса;
4. Модель градиентного бустинга;
5. Модель стакинга.

Результаты работы алгоритмов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Метрики, полученные в результате работы алгоритмов.

Алгоритм	Коэффициент детерминации (R^2)	Средняя абсолютная погрешность	Средняя абсолютная

			процентная погрешность
Линейная регрессия	0.376	$8,015 \cdot 10^{-7}$	58,63
Дерево решений	0.999	$2,5 \cdot 10^{-9}$	0,17
Случайный лес	0,948	$1,51 \cdot 10^{-7}$	6,52
Градиентный бустинг	0.983	$9,09 \cdot 10^{-8}$	4,94
Стакинг	0.99	$6,91 \cdot 10^{-8}$	3,75

Как видно из таблицы 1 – лучший результат получился у алгоритма дерева решений и стакинга, а худший – у линейной регрессии и случайного леса.

В пятой главе представлено описание эксперимента.

После проведения компьютерного моделирования, разработанный алгоритм обработки автодинного сигнала был использован при обработке экспериментального сигнала на тестовом объекте. В качестве тестового объекта, колебания которого измерялись полупроводниковым лазерным автодином, была выбрана пьезокерамика. Пьезокерамические элементы применяются в устройствах, преобразующих механические воздействия в электрические сигналы (с использованием прямого пьезоэлектрического эффекта), электрические сигналы в механические (с использованием обратного пьезоэлектрического эффекта).

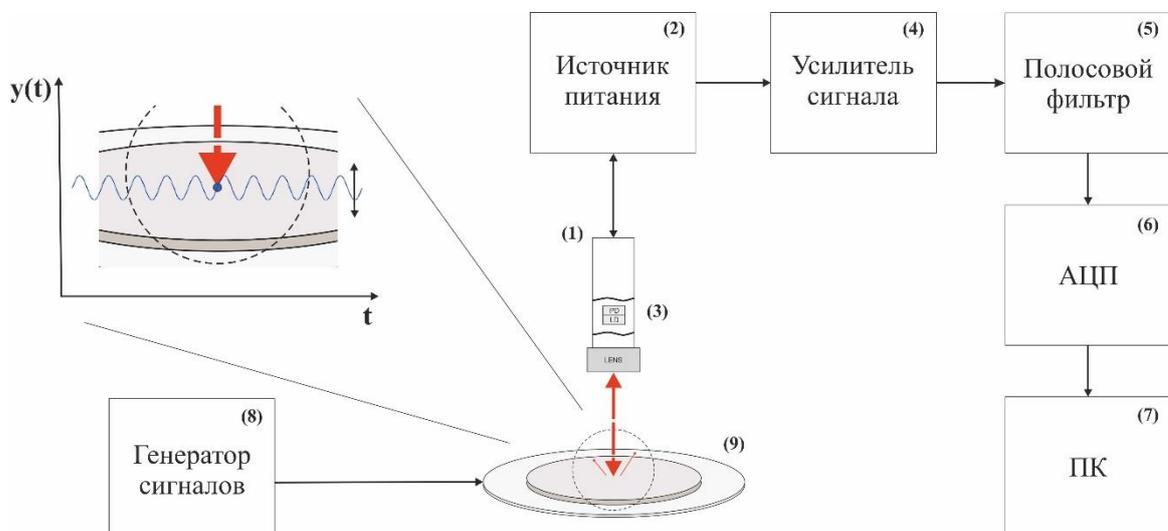
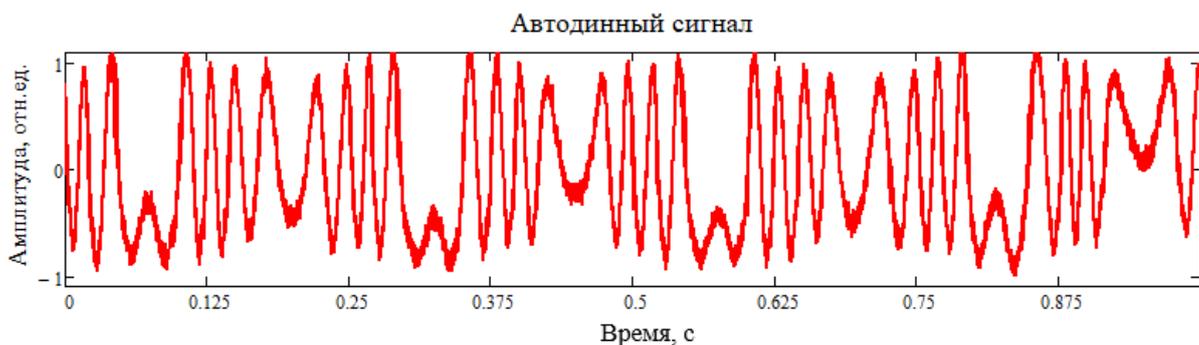
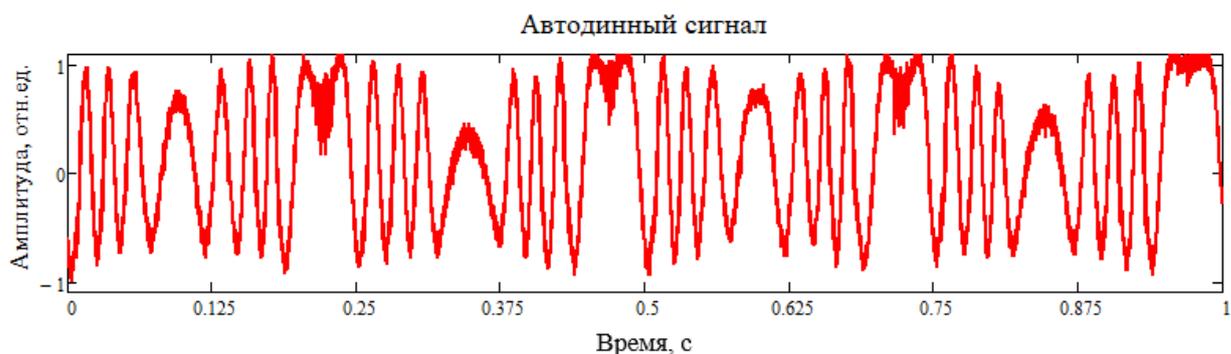
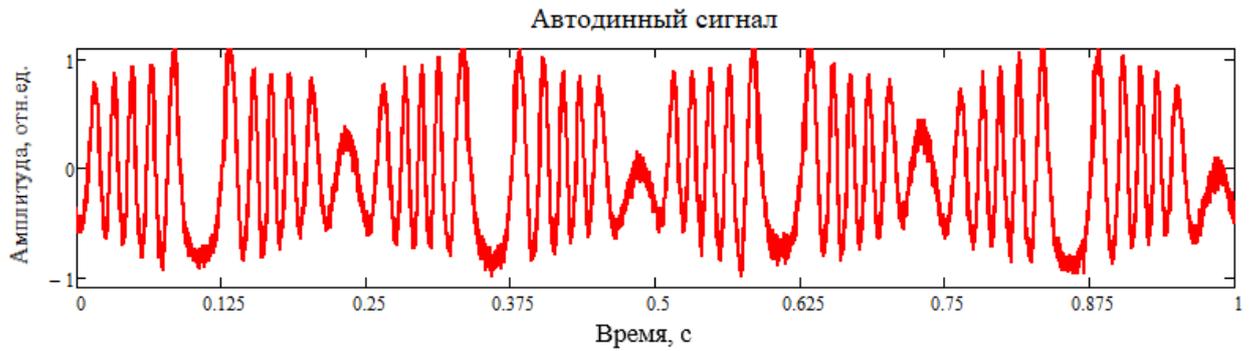


Рисунок 13 – Блок схема экспериментальной установки: 1 – полупроводниковый лазер, 2 – источник питания, 3 – лазерный диод, 4 – усилитель сигнала, 5 – полосовой фильтр, 6 – АЦП, 7 – ПК 8 – генератор сигналов, 9 – объект

На рисунке 13, источник питания 1 питает полупроводниковый лазер 2. После чего на исследуемый объект 7 направляют когерентное излучение создаваемое полупроводниковым лазером 2. Отраженное от исследуемого объекта излучение фиксируется при помощи фотоприемника 3. После чего усиливается с помощью широкополосного усилителя 4 и попадает на вход аналого-цифрового преобразователя 5 и на компьютер 6. Далее проводится анализ спектра полученного автодинного сигнала.

Целью эксперимента было определение амплитуды нановибраций. Для этого бы ли зарегистрированы автодинные сигналы при разных амплитудах вибрации пьезокерамики, представленные на рисунке 14 (а-в)соответственно.





в)

Рисунок 14 – а), б), в) – Автодинные сигналы снятые в ходе эксперимента.

Для полученных автодинных сигналов были построены спектры представленные на рисунке 15 а), б), в).



а)



б)



в)

Рисунок 15 – а), б), в) – Спектры построенные по экспериментальным измерениям.

Значения гармоник зарегистрированных автодинных сигналов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения гармоник зарегистрированных сигналов.

Сигнал	Sn-2	Sn-1	Sn	Sn+1	Sn+2
а	0.10169	0.14983	0.16701	0.14327	0.08486
б	0.11586	0.08477	0.21692	0.08483	0.11093
в	0.07356	0.13538	0.15383	0.09519	0.07982

Произведём вычисление амплитуды зарегистрированных сигналов при помощи алгоритмов машинного обучения. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты вычисления значений амплитуды.

Источник	Амплитуда, нм		
	Дерево решений	417	405
Градиентный бустинг	523	542	747
Стакинг	356	376	592

Код написанной программы приведён в приложении А.

Полученные параметры позволяют определить амплитуду нановибрации исследуемого объекта при помощи метода ряда гармоник “J1..J4”[22]. Рассчитанные значения приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты вычисления амплитуды.

Сигнал	Амплитуда, нм
а	442
б	471
в	672

В шестой главе представлено сравнение результатов измерений различными методами

В таблице 5 представлены результаты работы алгоритмов машинного обучения, а так же результаты метода ряда гармоник “J1..J4”. Вычисления проводились при одинаковых значениях гармоник автодинного сигнала.

Таблица 5 – Результаты вычисления амплитуды.

Источник	Амплитуда, нм		
	442	471	672
Метод “J1..J4”	442	471	672
Дерево решений	417	405	594
Градиентный бустинг	523	542	747
Стакинг	356	376	592

Как видно из таблицы, результаты модели дерева решений близки к результатам метода ряда гармоник, который принят как эталонный, в то время как модели стакинга и градиентного бустинга имеют с ним значительные расхождения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы были получены следующие результаты:

- 1) Проведено компьютерное моделирование, позволяющее получить автодинный сигнал при различных значениях амплитуды колебаний исследуемого объекта.
- 2) Созданы и проанализированы алгоритмы на основе машинного обучения с целью определения амплитуды нановибраций внешнего отражателя.
- 3) Определены амплитуды нановибраций исследуемого объекта с помощью метода ряда гармоник.
- 4) Произведено сравнение результатов определения амплитуды с помощью различных методов.

В ходе проведения экспериментальных исследований были получены следующие значения амплитуд: 442, 471, 672 нм. Наиболее близкие результаты показал метод дерева решений, а рассчитанные им значения амплитуд составили: 417, 405 и 594 нм соответственно.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пойзнер Б.Н. Физические основы лазерной техники: Учебное пособие. / Б.Н. Пойзнер: Томский государственный университет, 2006. 210 с.
2. Крылов К.И. Основы лазерной техники: Учеб. пособие для студентов приборостроительных спец. Вузов / К.И. Крылов В.Т. Прокопенко В.А. Тарлыков – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. 316 с
3. Голубев В.С. Лазерная техника и технология. / В. С. Голубев, Ф. В. Лебедев; под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Высш. Шк., 1987. 176 с.
4. Физика полупроводниковых лазеров: Пер. с японск./ Под ред. Х. Такумы. М.: Мир, 1989. 310 с.
5. Прохоров А.М. Физическая энциклопедия в 5 т. Т. 1 / А.М. Прохоров 1988г. 705 с.
6. Добряков В.А., Игнатъев А.А., Сигитов Е.А. Лазерный Интерферометр как элемент информационно -измерительной системы для прецизионного металлообрабатывающего оборудования // СГТУ, 2007. 22с
7. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Гангнус С.В. Решение обратной задачи для восстановления параметров сложного периодического движения в лазерной гомодинной системе // Всероссийская Академия Наук Сибирское Отделение. №1, 2001. С. 117-122
9. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Вагарин В.А., Васильев М.Р. Гомодинные методы измерения // Зарубеж. Радиоэлектрон, 1995. № 6. С. 135-141.
10. Усанов Д.А., Гангнус С.В., Скрипаль А.В. Определение параметров движений объекта с помощью оптического гомодинного метода // Всероссийская Академия Наук Сибирское Отделение. №1, 1999. С. 31-37
11. Вагарин В.А., Скрипаль А.В., Усанов Д.А. Измерение негармонических вибраций спектральным гомодинным методом. // Всероссийская Академия Наук Сибирское Отделение. №1, 2000. С. 28-35

12. Чанилов О.И. Определение параметров движения отражателя в интерференционной системе с помощью Фурье- и вейвлет-преобразований / О.И. Чанилов 2005. С. 114

13. Дарзбек С.А., Желкобаев Ж., Календин В.В., Новиков Ю.А. Лазерный интерферометрический измеритель наноперемещений // Труды института общей физики им. А.М. Прохорова. 2006. Т.62. С. 14-37.

14. Тодуа П.А. Метрология в нанотехнологии // ОАО «Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума», г. Москва, 2006г. С. 69