

КАЩАВЦЕВ ЕВГЕНИЙ ОЛЕГОВИЧ

**ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕЙ ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ
НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ,
В ТОМ ЧИСЛЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ, ПРИ МИКРО- И
НАНОСМЕЩЕНИЯХ ПО АВТОДИННОМУ СИГНАЛУ
ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА**

01.04.21 – лазерная физика

03.01.02 – биофизика

Автореферат

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Саратов - 2012

Работа выполнена на кафедре медицинской физики
Саратовского государственного университета имени Н.Г.Чернышевского

Научные руководители: Заслуженный деятель науки РФ,
доктор физико-математических наук, профес-
сор Усанов Дмитрий Александрович

доктор физико-математических наук, профес-
сор Скрипаль Анатолий Владимирович.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Ульянов Сергей Сергеевич, кафедра
оптики и биофотоники Саратовского государ-
ственного университета имени
Н.Г.Чернышевского, профессор;

доктор физико-математических наук,
профессор Горбатенко Борис Борисович, ка-
федра «Физика» Саратовского государственно-
го технического университета имени Гагарина
Ю.А., профессор

Ведущая организация: Саратовский филиал Института радиотехники
и электроники Российской академии наук, (СФ
ИРЭ РАН), г. Саратов

Защита диссертации состоится 27 декабря 2012 г. в 11 час. 00 мин. на заседании
диссертационного совета Д.212.243.05 по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астра-
ханская, 83, III корпус, ауд. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке СГУ
имени В.А. Артисевич

Автореферат разослан " ____ " ноября 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Дербов В.Л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Для измерения параметров движений объектов при микро и наносмещениях широкое распространение получили методы, основанные на использовании автодинного эффекта в полупроводниковых лазерах.

Важным параметром при проведении измерений характеристик движений объекта с использованием лазерной автодинной системы является уровень внешней оптической обратной связи. В автодинной системе часть излучения возвращается в активную область резонатора, при этом режим, при котором автодинный сигнал аналогичен интерференционному, возможен при уровнях обратной связи, меньших некоторого строго определенного значения. При увеличении уровня обратной связи происходит искажение автодинного сигнала, и он начинает отличаться от сигнала, продетектированного в интерференционной системе с развязкой от источника излучения.

Как было показано ранее, уровень внешней оптической обратной связи оказывает существенное влияние на форму автодинного сигнала и, как результат, на точность определения параметров движения отражателя.

Обычно предполагается, что реализуются условия, когда уровень обратной связи мал. На практике эти условия не всегда могут выполняться, например, при высоком коэффициенте отражения поверхности объекта, параметры движения которого измеряются.

В ряде случаев для определения параметров микровибраций отражателя влиянием внешней оптической обратной связи можно пренебречь. Однако при определении амплитуды нановибраций анализ влияния на результат измерений ранее не проводился. При этом известные методы определения уровня внешней оптической обратной связи при измерениях амплитуды нановибраций не могут быть применены из-за существенного отличия в форме автодинного сигнала. В связи с этим представляет интерес разработка метода определения амплитуды нановибраций с учетом влияния внешней оптической обратной связи лазерного автодина.

Авторами ряда работ показана возможность использования полупроводникового лазера, работающего в автодинном режиме, для определения ускоренного движения объекта, совершающего микроперемещение, в предположении, что влиянием уровня внешней оптической обратной связи на результаты измерений можно пренебречь. При этом анализ влияния внешней оптической обратной связи на форму автодинного сигнала при ускоренном движении объекта, совершающего микроперемещение, ранее не проводился.

Полупроводниковый лазерный автодин может быть использован при изучении динамического состояния биологических объектов. С помощью лазерной автодинной системы различными авторами были проведены исследования биений сердца дафнии, измерение параметров движений барабанной перепонки, измерение внутриглазного давления, измерение микросмещений лучевой артерии человека.

В настоящее время актуальной остается задача измерения формы пульсовой волны с помощью полупроводникового лазерного автодина. Пульсовая волна не-

сет информацию о состоянии сердечно-сосудистой системы. Функциональное состояние сердечно-сосудистой системы играет важную роль в адаптации организма к физическим нагрузкам и является одним из основных показателей предельных возможностей организма.

Известные контактные методы измерения формы пульсовой волны, такие как сфигмография, осциллометрический метод, могут вносить погрешность в результат измерений в силу контактного принципа измерения. Существующие бесконтактные интерференционные методы не обеспечивают простоту и достаточную точность измерений. Известны методы, в которых исследуется зависимость от времени изменения частоты доплеровского сигнала. При этом отмечалось, что по доплеровскому сигналу не удастся определить направление смещения поверхности кожи, что затрудняет восстановление формы пульсовой волны.

В связи с этим актуальной для биофизики является задача по восстановлению формы движения отражателя, в качестве которого может выступать поверхность кожи над артерией человека, с учетом определения направления смещения и с использованием полупроводникового лазерного автодина, решение которой, в свою очередь, позволяет сделать вывод о состоянии сосудистой системы человека.

Вышесказанным в качестве **актуальных задач**, которые необходимо решить в диссертационной работе, позволяет сформулировать следующее:

1. Определение параметров внешней оптической обратной связи по автодинному сигналу полупроводникового лазера.
2. Разработка метода определения нанометровых амплитуд вибраций объекта по автодинному сигналу с учетом уровня внешней оптической обратной связи.
3. Определение ускорения при микросмещениях объекта по автодинному сигналу полупроводникового лазера с учетом влияния внешней оптической обратной связи.
4. Исследование возможности применения полупроводникового лазерного автодина для восстановления формы пульсовой волны лучевой артерии человека и оценки состояния сердечнососудистой системы.

На основании вышеизложенного была сформулирована **цель диссертационной работы**: исследование влияния внешней оптической обратной связи на результат определения параметров движений (вибрации с нанометровыми амплитудами; движения с изменяющимся во времени ускорением) отражающих, в том числе биологических, объектов при микро- и наносмещениях по автодинному сигналу полупроводникового лазера.

Новизна исследований, проведенных в ходе выполнения диссертационной работы, состоит в следующем:

1. Разработан метод определения амплитуды нановибраций объекта по автодинному сигналу полупроводникового лазера, позволяющий значительно повысить точность измерений вследствие учета уровня внешней оптической обратной связи.
2. Разработан метод определения изменяющегося во времени ускорения при микросмещениях объекта по автодинному сигналу полупроводникового лазера с учетом влияния внешней оптической обратной связи.

3. Показана возможность восстановления функции движения отражателя, в качестве которого выступает поверхность кожи над лучевой артерией человека в области запястья, с учетом определения направления смещения и с использованием полупроводникового лазерного автодина.

4. Исследована возможность оценки риска возникновения острой сосудистой недостаточности организма человека по форме пульсовой волны.

Достоверность полученных теоретических результатов обеспечивается строгостью используемых математических моделей, соответствием результатов численного и натурального экспериментов. Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается применением стандартной измерительной аппаратуры, высокой степенью автоматизации процесса регистрации экспериментальных данных, а также соответствием результатов, полученных в ходе определения параметров движения отражателя с помощью автодинной интерференционной системы.

Практическая значимость полученных результатов заключается в следующем:

1. Разработанный метод определения амплитуды нановибраций объекта по автодинному сигналу полупроводникового лазера позволяет значительно повысить точность измерений при учете уровня внешней оптической обратной связи.

2. Учет уровня внешней оптической обратной связи в автодинной системе позволяет повысить точность определения изменяющегося во времени ускорения при неравномерно ускоренных микроперемещениях объекта, определяемого из сравнения экспериментального и модельного автодинных сигналов полупроводникового лазера с применением метода наименьших квадратов.

3. Восстановление формы пульсовой волны лучевой артерии человека по автодинному сигналу полупроводникового лазера с учетом направления смещения стенки артерии позволяет оценивать риск возникновения острой сосудистой недостаточности.

4. Предложенные методы определения параметров нановибраций и ускорения при нано- и микросмещениях могут найти применение, для диагностики характеристик движения отражающих объектов в биологии и медицине.

5. Полученные в диссертационной работе результаты использованы при выполнении НИР в рамках государственного задания ВУЗам на выполнение НИР («Биоинформационные технологии оценки состояния подсистем организма человека и биологических объектов», 2011. Государственный контракт № 16.740.11.0500. ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 г.г.; «Разработка научно-методического обеспечения скрининг диагностики функционального состояния обучающихся для выявления опасности развития коллапсоидальных осложнений на основе специализированных аппаратно-программных комплексов», 2009-2011. Государственный контракт № 2.2.3.3/6837. Аналитическая ведомственная целевая программа "Развитие научного потенциала высшей школы»).

6. Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы будут использованы в учебном процессе для подготовки магистров, обучающихся по направлению «011200 Физика» (магистерской программе «Медицинская физи-

ка») по дисциплине «Оптические методы функциональной диагностики сердечнососудистой системы», изучаемой студентами дневного отделения факультета нано- и биомедицинских технологий Саратовского государственного университета имени Н.Г Чернышевского.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Амплитуда нановибраций с учетом уровня внешней оптической обратной связи может быть определена по величине первой гармоники спектра автодинного сигнала, нормированной на ее максимальное значение, соответствующее известной амплитуде вибраций и измеряемое при изменении амплитуды возбуждаемых дополнительно механических колебаний.

2. При неравномерно ускоренных микросмещениях объекта величина ускорения может быть определена из сравнения экспериментального и модельного, учитывающего уровень внешней оптической обратной связи, автодинных сигналов полупроводникового лазера с применением метода наименьших квадратов.

3. Форма пульсовой волны лучевой артерии человека может быть восстановлена по автодинному сигналу полупроводникового лазера, при этом определить направление смещения стенки лучевой артерии позволяет учет внешней оптической обратной связи.

4. Восстановленная форма пульсовой волны и измеренная вариабельность сердечного ритма характеризуют степень риска возникновения острой сосудистой недостаточности.

Апробация работы. Работа выполнена на кафедре медицинской физики Саратовского государственного университета в 2009-2012 годы. Основные положения и результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, докладывались и обсуждались на:

– Международной школе для студентов и молодых ученых по оптике, лазерной физике и биофизике Saratov Fall Meeting (г. Саратов, 2011-2012);

– VII Саратовском Салоне изобретений, инноваций и инвестиций (г. Саратов 2012);

– V Троицкой конференции «Медицинская физика и инновации в медицине» (г. Троицк, Московская область, 2012);

– 10th International Conference on Vibration Measurements by Laser and Noncontact Techniques - AIVELA 2012 (Ancona, Italy, 2012);

– XIV Международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы» (г. Ульяновск, 2012),

– Всероссийской молодежной конференции «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине» (г. Саратов, 2012);

– VI Всероссийской конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (г. Саратов, 2012).

По результатам исследований, выполненных при работе над диссертацией, **опубликовано 9 работ**, в том числе 3 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК, тезисы 6 докладов на всероссийских и международных конференциях.

Личное участие автора в этой работе выразилось в теоретической разработке и практической реализации метода определения амплитуды нановибраций

с учетом уровня внешней оптической обратной связи, теоретической разработке и практической реализации метода определения изменяющегося во времени ускорения при микросмещениях объекта по автодинному сигналу полупроводникового лазера с учетом влияния внешней оптической обратной связи, применении полупроводникового лазерного автодина для определения формы пульсовой волны лучевой артерии человека по сигналу полупроводникового лазерного автодина, с возможностью использования полученных результатов для оценки риска возникновения острой сосудистой недостаточности, участии в формулировании научных положений и выводов.

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 100 страниц машинописного текста, включая 28 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 134 наименования и изложен на 15 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель диссертационной работы, определена новизна исследований, обсуждена практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, изложено краткое содержание диссертации.

В первом разделе приведены результаты критического анализа исследований параметров движений объектов, в том числе биологических, с помощью лазерного автодина, приведен критический анализ метода автодинного детектирования в полупроводниковых лазерах, рассмотрены лазерные автодинные методы для определения характеристик движения внешнего отражателя, влияние внешней оптической обратной связи в автодинной системе на низкочастотный спектр автодинного сигнала при вибрациях объекта и на точность определения параметров вибраций, проанализированы возможности автодинных методов измерения для исследования параметров движения биологических объектов.

Во втором разделе приведены результаты исследования влияния уровня внешней оптической обратной связи в автодинной системе на форму и спектр протектированного сигнала, предложен метод определения уровня внешней оптической обратной связи при вибрациях внешнего отражателя.

Для теоретического анализа влияния обратной связи на форму автодинного сигнала полупроводникового лазера использована модель составного резонатора лазера с обратной связью, описываемая уравнениями Р. Лэнга и К. Кобаяши (1) и (2):

$$\frac{d}{dt} E^*(t) = i\omega(N) \cdot E^*(t) + \frac{1}{2} \left(G(N) - \frac{1}{\tau_p} \right) E^*(t) + z \cdot E^*(t - \tau), \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} N(t) = J - \frac{N(t)}{\tau_s} - G(N) \cdot E^2(t), \quad (2)$$

где $E^*(t) = E(t) \exp(i\omega_0 t + i\Phi(t))$, $E(t)$ - амплитуда комплексного электрического поля $E^*(t)$ внутри лазерного резонатора, ω_0 - резонансная частота резонатора лазерного диода, $\omega(N)$ - частота генерации лазера с обратной связью, $\Phi(t)$ - фаза оп-

тических колебаний поля, $G(N)$ - коэффициент усиления моды, $N(t)$ - концентрация носителей в активной области диода, τ_p - время жизни фотонов в диодном резонаторе, J - число носителей, инжектируемых в единицу объема за единицу времени (величина, пропорциональная току инжекции), τ_s - время жизни носителей, обусловленное спонтанной рекомбинацией, τ - время обхода внешнего резонатора длиной L , z - коэффициент обратной связи.

Стационарное решение уравнений (1) и (2) дает зависимость амплитуды автодинного сигнала от времени и уровня обратной связи (3) и (4):

$$P(t, C) = \cos(\omega(t, C) \tau(t)), \quad (3)$$

$$\omega_0 = \omega + z \cdot \sqrt{1 + \alpha^2} \cdot \sin(\omega \tau + \arctg \alpha). \quad (4)$$

Функция $\omega(t)$ находится из фазового уравнения:

$$\omega_0 \tau = \omega \tau + C \cdot \sin(\omega \tau + \psi), \quad (5)$$

где $C = \tau \cdot z \cdot \sqrt{1 + \alpha^2}$, C - уровень внешней оптической обратной связи, $\psi = \arctg \alpha$, α - коэффициент уширения линии генерации.

Влияние уровня обратной связи на форму автодинного сигнала в случае движения объекта по гармоническому закону иллюстрируется рисунком 1. При этом время обхода лазерным излучением внешнего резонатора изменяется по закону:

$$\tau(t) = \tau_0 + \tau_a \cdot \sin(\Omega t + \varepsilon), \quad (6)$$

где Ω - частота гармонических колебаний объекта, $\tau_0 = 2L/c$, $\tau_a = 2\xi/c$, ξ - амплитуда вибраций объекта, ε - начальная фаза колебаний объекта.

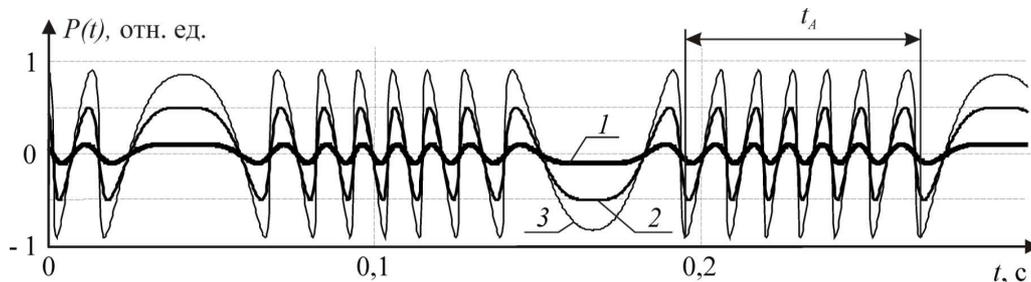


Рисунок 1 – Переменная составляющая автодинного сигнала при разных уровнях обратной связи: кривая 1 – $C = 0.1$; кривая 2 – $C = 0.5$; кривая 3 – $C = 0.9$.

При увеличении уровня обратной связи изменяется время нарастания и время убывания автодинного сигнала.

В результате компьютерного моделирования при разных уровнях обратной связи, при разных параметрах движения объекта была получена зависимость, приведенная на рисунке 2, – отношение времени убывания амплитуды автодинного сигнала ко времени ее нарастания от уровня обратной связи на временном интервале t_A , по которой можно определять уровень обратной связи.

Как было установлено, при вибрациях объекта с нанометровыми амплитудами при минимальном уровне обратной связи в спектре автодинного сигнала присутствует только гармоника на частоте колебания объекта. Поэтому, представляется целесообразным рассмотреть влияние уровня обратной связи на амплитуду гармоники на частоте колебания объекта.

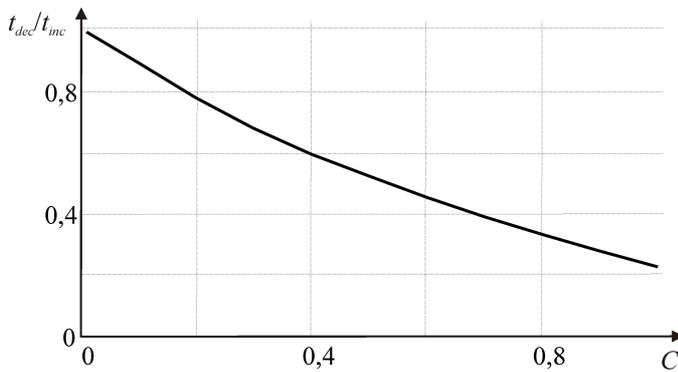


Рисунок 2 – Зависимость отношения времени убывания t_{dec} ко времени нарастания t_{inc} функции автодинного сигнала от уровня обратной связи C .

Для описания спектра автодинного сигнала нормированная мощность излучения полупроводникового лазера $P(t)$ может быть представлена в виде разложения в ряд Фурье:

$$P(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \{a_n \cos n\omega t - b_n \sin n\omega t\}. \quad (7)$$

Ранее было показано, что амплитуды спектральных составляющих зависят от амплитуды вибраций ξ и уровня внешней оптической обратной связи C . Для определения амплитуды нановибраций используется амплитуда спектральной составляющей автодинного сигнала на частоте колебаний объекта, значение которой также зависит от стационарного набега фазы излучения лазерного диода θ . Графики зависимости амплитуды спектральной составляющей автодинного сигнала на частоте колебаний объекта от ξ , θ и C приведены на рисунке 3.

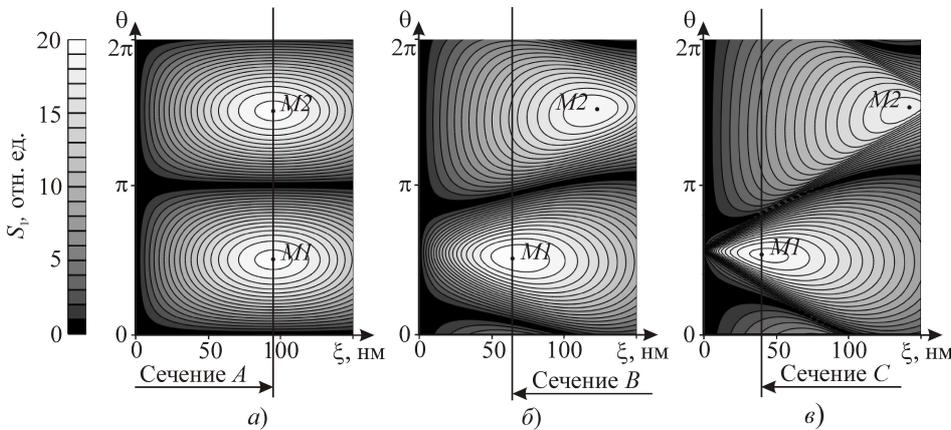


Рисунок 3 – Изображение изолиний амплитуды гармоники $S_1(\xi, \theta)$ спектра автодинного сигнала на частоте колебаний объекта при различных уровнях внешней оптической обратной связи C : а - $C = 0.0001$; б - $C = 0.5$; в - $C = 0.9$.

На графиках, представленных на рисунке 3, наименьшему значению амплитуды первой гармоники спектра автодинного сигнала соответствует темная область графика, максимальному значению - светлая область графика (точки $M1$, $M2$). Как следует из результатов, приведенных на рисунке 3, при увеличении уровня обратной связи максимальному значению амплитуды первой гармоники соответствуют следующие значения амплитуды вибраций: для точки $M1$ при $C = 0.0001$ $\xi_{M1} = 96$ нм, при $C = 0.5$ $\xi_{M1} = 69$ нм, при $C = 0.9$ $\xi_{M1} = 45$ нм; для точки $M2$ при $C = 0.0001$ $\xi_A = 96$ нм, при $C = 0.5$ $\xi_A = 121$ нм, при $C = 0.9$ $\xi_A = 140$ нм. Т.е., видно, что при увеличении уровня обратной связи происходит значительное смещение максимумов $M1$ и $M2$ по оси абсцисс ξ , в то время как по оси ординат θ максимумы смещаются незначительно.

В третьем разделе приведены результаты теоретической разработки и практической реализации метода определения амплитуды нановибраций с учетом уровня внешней оптической обратной связи.

Для определения характеристик вибрирующих объектов с нанометровыми амплитудами без учета уровня внешней оптической обратной связи используется метод, основанный на проведении нормировки амплитуды гармоники спектра вибраций отражателя на частоте дополнительных механических колебаний. При проведении измерений регистрируется амплитуда первой гармонической составляющей S_x спектра автодинный сигнал при искомой амплитуде нановибраций. Далее при наложении дополнительных механических колебаний, последовательно увеличивают их амплитуду до тех пор, пока первая гармоника спектра не достигнет максимума, и фиксируют ее амплитудное значение S_{1max} .

Для определения искомой амплитуды колебаний объекта с учетом уровня внешней оптической обратной связи нами предложено построить нормировочную зависимости амплитуды первой гармоники S_1 спектра автодинного сигнала, нормированной на ее максимальное значение S_{1max} , от амплитуды нановибраций. Зависимость S_1/S_{1max} от ξ может быть построена из соотношения для функции автодинного сигнала (3) при использовании ряда Фурье (7). Эта зависимости при разных уровнях обратной связи приведена на рисунке 4. Зависимости, представленные на рисунке 7, построены при стационарном набеге фазы $\theta = 0.5 \pi$, соответствующем максимальному значению первой гармоники спектра автодинного сигнала.

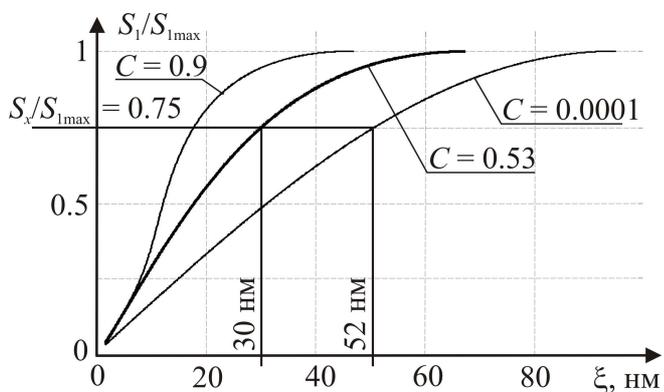


Рисунок 4 – Зависимость S_1/S_{1max} от амплитуды вибрации ξ при разных уровнях внешней оптической обратной связи C .

Экспериментальные исследования проводились на полупроводниковом лазерном автодине, в качестве источника излучения которого использовался лазерный диод RLD-650 с характеристиками: мощность излучения 5 мВт, длина волны 654 нм.. В качестве внешнего отражателя использовался пьезоизлучатель типа VSB35EW0701B.

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 5. Излучение полупроводникового лазера 1, запитываемого от источника тока 2, направлялось на отражатель 3, закрепленный на пьезокерамике 4, колебания которой возбуждались генератором звуковых колебаний 5. Часть излучения, отраженного от объекта, возвращалась в резонатор полупроводникового лазера, изменение выходной мощности которого регистрировалось фотодетектором 6. Изменение уровня обратной связи производилось путем изменения степени фокусировки пучка лазерного излучения. Сигнал с фотодетектора поступал через широкополосный усилитель 8, содержащий фильтр переменного сигнала 7, на вход аналого-цифрового преобразователя 9 компьютера 10 для сохранения в памяти и последующей обработки.

С помощью генератора звуковых колебаний в пьезокерамике вызывались дополнительные механические вибрации, амплитуда которых изменялась во времени. Амплитуда дополнительных вибраций увеличивалась до тех пор, пока амплитуда первой гармоники спектра автодинного сигнала не достигала максимального значения, при котором фиксировался автодинный сигнал. По его спектру определялось максимальное значение амплитуды первой гармоники S_{1max} . На рисунке 6 а приведены форма одного из измеренных автодинных сигналов при максимальном значении первой спектральной составляющей. Его спектр приведен на рисунке 6 б. Усредненное значение S_{1max} составило 0.277 отн. ед.

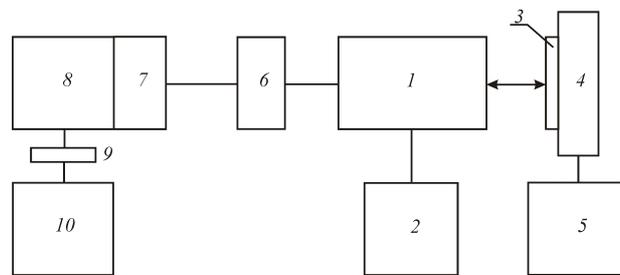
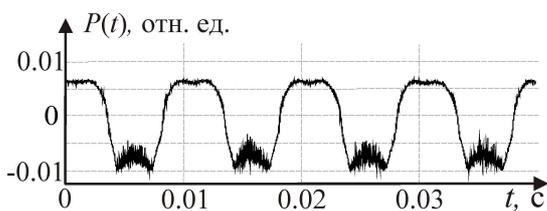
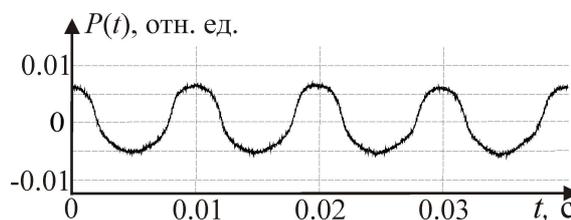


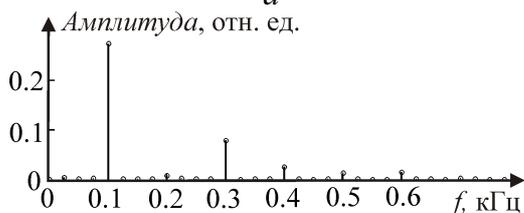
Рисунок 5 – Блок-схема установки.



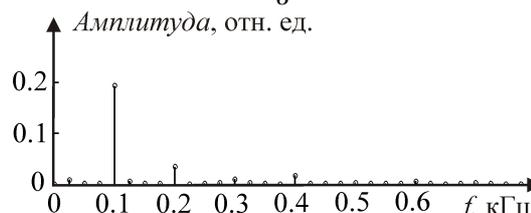
а



в



б



г

Рисунок 6 – Автодинный сигнал вибраций объекта (а) с амплитудой вибраций, соответствующей максимальному значению первой гармоники, его спектр (б), автодинный сигнал вибраций объекта с неизвестной нанометровой амплитудой (в) и его спектр (г).

Для определения уровня обратной связи амплитуду дополнительных механических колебаний увеличивали до микрометровых значений. На рисунке 7 приведена форма экспериментального автодинного сигнала при микровибрациях.

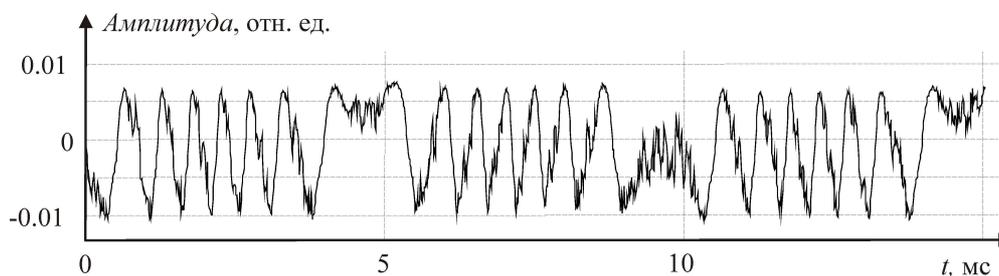


Рисунок 7 – Измеренный автодинный сигнал при микровибрациях объекта для определения уровня обратной связи.

Усредненное отношение времени убывания ко времени нарастания составило 0.79. Такому отношению соответствует уровень внешней оптической обратной связи $C = 0.53$ (рисунок 2).

После исключения дополнительных механических колебаний измерялся автодинный сигнал вибраций объекта с неизвестной нанометровой амплитудой при

вычисленном уровне обратной связи и известных параметрах $S_{1\max}$ и ξ_{\max} . Форма и спектр измеренного автодинного сигнала приведена на рисунке 6 в и 6 г соответственно. Усредненное значение амплитуды первой гармоники S_x составило 0.207 отн. ед. Отношение $S_x/S_{1\max}$ для приведенных экспериментальных автодинных сигналов, составило величину 0.75.

Для полученного уровня обратной связи ($C = 0.53$) была построена нормировочная зависимость $S_1/S_{1\max}$ от амплитуды вибрации ξ , представленная на рисунке 4, по которой была определена амплитуда нановибраций для автодинного сигнала, приведенного на рисунке 6 в, которая составила 30 нм. Без учета уровня внешней оптической обратной связи (рисунок 4, кривая при $C = 0.0001$) измеренная описанным выше методом амплитуда нановибраций составила 52 нм.

Результаты измерений амплитуды нановибраций ξ с учетом уровня обратной связи и без его учета для различных уровней обратной связи приведены в таблице 1. Измерения проводились многократно с целью повышения их достоверности. При вычислениях использовались усредненные значения измеренных величин. По результатам измерений при различных уровнях обратной связи среднее значение амплитуды нановибраций составило 29 нм.

Как следует из результатов, приведенных в таблице 1, с ростом уровня обратной связи увеличивается погрешность определения амплитуды нановибраций, по сравнению со случаем, когда влияние обратной связи в автодинной системе на результат измерений учитывается.

Таблица 1

Измеренный уровень обратной связи	Значение искомой амплитуды нановибраций ξ с учетом уровня обратной связи, нм.	Значение амплитуды нановибраций ξ без учета уровня обратной связи, нм.	Относительная погрешность определения амплитуды нановибраций $\delta\xi$ без учета уровня обратной связи, %
$C = 0.19$	30	36	24
$C = 0.39$	27	40	38
$C = 0.53$	30	52	79

Таким образом, в предложенном методе определения амплитуды нановибраций, заключающемся в измерении величины первой гармоники спектра автодинного сигнала, нормированной на ее максимальное значение, соответствующее известной амплитуде вибраций и измеряемое при изменении амплитуды возбуждаемых дополнительно механических колебаний, учет уровня внешней оптической обратной связи позволяет значительно повысить точность измерений.

В четвертом разделе приведены результаты теоретической разработки и практической реализации метода определения ускорения при микросмещениях объекта по автодинному сигналу полупроводникового лазера с учетом влияния внешней оптической обратной связи.

В случае движения объекта с неравномерно изменяющимся ускорением, время обхода лазерным излучением внешнего резонатора изменяется по закону:

$$\tau(t) = \frac{2}{c} \int_0^t (V_0 + \int_0^t a(t) dt) dt, \quad (8)$$

где V_0 – начальная скорость движущегося объекта, t – интервал времени наблюдаемого автодинного сигнала на различных участках движения, $a(t)$ – ускорение внешнего отражателя, изменяющееся во времени. Переменная нормированная составляющая автодинного сигнала имеет вид:

$$P(t, C) = \cos\left(\omega(t, C) \cdot \frac{2}{c} \int_0^t (V_0 + \int_0^t a(t) dt) dt\right). \quad (9)$$

Для нахождения изменяющегося во времени ускорения интервал наблюдения автодинного сигнала (4.3) можно разбить на n временных окон, в пределах каждого из которых значение ускорения a_n можно считать постоянным. В этом случае для каждого n -ого окна переменная нормированная составляющая автодинного сигнала будет иметь вид:

$$P(t, C) = \cos\left(\omega(t, C) \cdot \frac{2}{c} (V_{0n} \cdot t + \frac{a_n \cdot t^2}{2})\right). \quad (10)$$

Искомая величина ускорения определяется из решения обратной задачи, заключающемся в определении минимума функционала, получаемого при суммировании квадратов разности экспериментальных $P_{эксн}$ и теоретических $P_{теор}$ величин автодинного сигнала для различных временных интервалов:

$$S(a, V_0) = \sum_i (P_{эксн}(t_i) - P_{теор}(t_i, a, V_0, C))^2. \quad (11)$$

Объектом исследований было выбрано коммутационное электромагнитное реле типа 904.3747. Для придания якорю электромагнитного реле неравномерного ускорения на реле подавался несимметричный одиночный импульс. Форма импульса задавалась с помощью встроенного в платформу NI ELVIS генератора импульсов, обеспечивающего нарастание и спад импульса по параболическому закону. Подобная форма импульса, подаваемого на реле, позволила реализовать движение объекта с ускорением, изменяющимся по линейному закону.

При проведении измерений на движущийся якорь реле направлялось лазерное излучение. Излучение, отраженное от поверхности якоря, регистрировалось встроенным фотодетектором. С фотодетектора сигнал через АЦП поступал на компьютер, где и сохранялся для последующей обработки.

Вид измеренных автодинных сигналов при неравномерно ускоренном движении объекта для различных уровней внешней оптической связи приведен на рисунке 8.

Для определения уровней обратной связи в автодинной системе при регистрации автодинных сигналов, приведенных на рисунке 8, был использован метод, предложенный во второй главе диссертационной работы. Для автодинного сигнала, представленного на рисунке 8 *а*, уровень внешней оптической обратной связи составил величину намного меньшую 1, т.е. $C = 0.03$, для автодинного сигнала на рисунке 8 *б* уровень обратной связи составил 0.33.

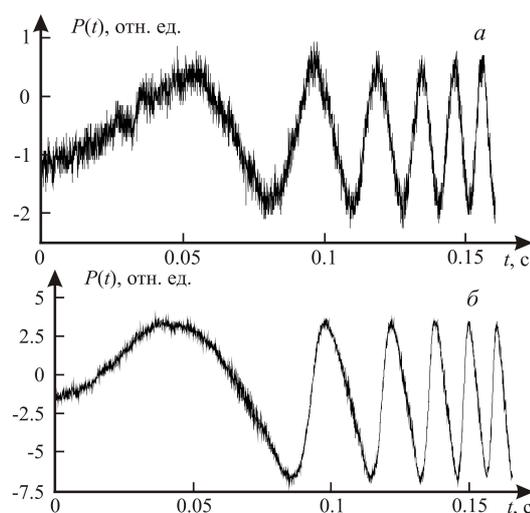


Рисунок 8 – Автодинные сигналы при неравномерно ускоренном движении внешнего отражателя при различных уровнях обратной связи C : *а* – 0.03, *б* – 0.33.

Для «очистки» измеренного сигнала от высокочастотных составляющих проводилось сглаживание экспериментальной кривой с использованием встроенной функции математического пакета *MathCad* – *ksmooth*. Полученные в результате сглаживания кривые использовались для сравнения с теоретической зависимостью в соотношении (4.6). Для этого весь интервал наблюдения был разделён на несколько временных окон. Необходимо было на каждом временном интервале определить значение параметра a и убедиться в том, что объект исследований совершал неравномерно ускоренное движение. На рисунке 9 показана зависимость изменения ускорения от времени, определённая в результате решения обратной задачи описанным способом.

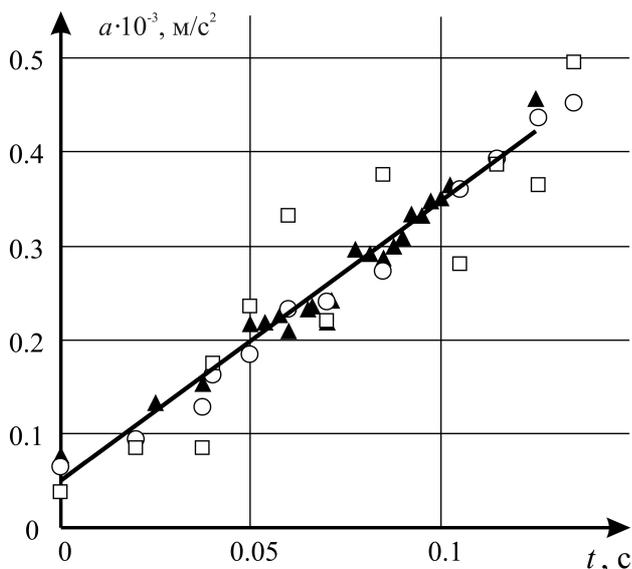


Рисунок 9 – Изменение ускорения объекта исследований:

▲ - результаты определения ускорения по автодинному сигналу, при уровне обратной связи $C = 0.03$;

○ - результаты определения ускорения с учетом уровня обратной связи, при $C = 0.33$;

□ - результаты определения ускорения без учета уровня обратной связи v , при $C = 0.33$;

— - линейная зависимость, аппроксимирующая результаты определения ускорения при уровне обратной связи $C = 0.03$.

Среднеквадратическое отклонение ускорения, определенного по автодинному сигналу при уровне обратной связи $C = 0.03$, приведенному на рисунке 8 а, от аппроксимирующей линейной зависимости составило величину 0.012. Среднеквадратическое отклонение ускорения, определенного по автодинному сигналу при уровне обратной связи $C = 0.33$, приведенному на рисунке 8 б, без учета уровня обратной связи, от аппроксимирующей линейной зависимости составило величину 0.051. Среднеквадратическое отклонение ускорения, определенного по автодинному сигналу при уровне обратной связи $C = 0.33$, приведенному на рисунке 8 б, с учетом уровня обратной связи, от аппроксимирующей линейной зависимости составило величину 0.014. Из сравнения полученных зависимостей следует, что среднеквадратическое отклонение ускорения от аппроксимирующей линейной зависимости заметно меньше при учете уровня обратной связи.

Таким образом, учет уровня внешней оптической обратной связи в автодинном сигнале позволяет повысить точность определения изменяющегося во времени ускорения при неравномерно ускоренных микросмещениях объекта.

В пятом разделе исследована возможность определения формы пульсовой волны лучевой артерии человека по сигналу полупроводникового лазерного автодина. Исследована возможность применения полупроводникового лазерного автодина для оценки риска возникновения острой сосудистой недостаточности по форме пульсовой волны.

Ранее было показано, что наибольшая опасность развития острой сосудистой недостаточности при стрессовых нагрузках имеется при наличии дисплазии соединительной ткани и нарушенной регуляции вегетативной нервной системы. К развитию коллапсоидной реакции может приводить сочетание этих двух факторов даже при отсутствии явно выраженной патологии по каждому из них. Указанные факторы могут быть определены по параметрам пульсовой волны.

В качестве анализируемых параметров пульсовой волны были выбраны следующие показатели: крутизна систолического подъема на участке быстрой и медленной фазы, скорость изменения пульсовой волны на катакроте, вариабельность кардиоинтервалов, определяемая по временным интервалам между максимумами (систолическими значениями) пульсовых волн.

Для анализа крутизны систолического подъема было предложено использовать следующие временные параметры: отношение времени быстрого нарастания давления в систолу $VH_{\text{быстр}}$ к периоду пульсовой волны – $T_{\text{пв}}$ (параметр Π_1), отношение времени анакроты VH к периоду пульсовой волны (параметр Π_2):

$$\Pi_1 = VH_{\text{быстр}} / T_{\text{пв}}, \quad (12)$$

$$\Pi_2 = VH / T_{\text{пв}}. \quad (13)$$

Временные интервалы $VH_{\text{быстр}}$, VH и $T_{\text{пв}}$ отмечены на пульсовой волне, изображенной на рисунке 10.

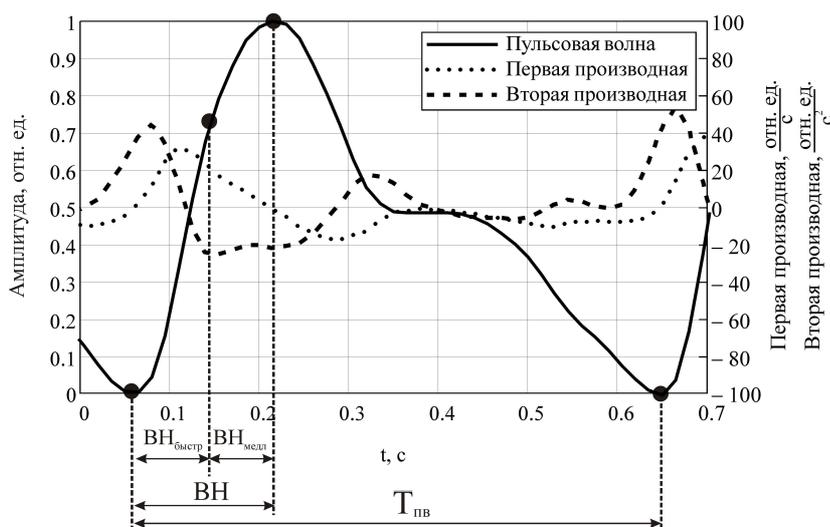


Рисунок 10 – Анализированные параметры пульсовой волны (обследуемый №1).

Параметры Π_1 , Π_2 и Π_3 вычислялись как усредненные значения по всем периодам нормированных по амплитуде пульсовых волн.

При наличии отклонений в деятельности сосудистой системы форма пульсовой волны изменяется (рисунок 11). При этом крутизна систолического подъема увеличивается, длительность уменьшается.

При нормальной форме пульсовой волны (рисунок 10) у условно здорового пациента вторая производная на участке катакроты плавно изменяется относительно нуля, что характеризует изменение кривизны и реакцию сосудов на фазы кровенаполнения.

Для анализа формы пульсовой волны использовался амплитудный параметр Π_3 , вычисляемый на её нисходящем участке (катакроте) по модулю второй производной от времени d^2A/dt^2 :

$$\Pi_3 = \frac{1}{N} \sum_i^N \left| \frac{d^2 A_i}{dt^2} \right| \quad (14)$$

где N – количество точек пульсовой волны, в которых вычислялась вторая производная по времени. Пара-

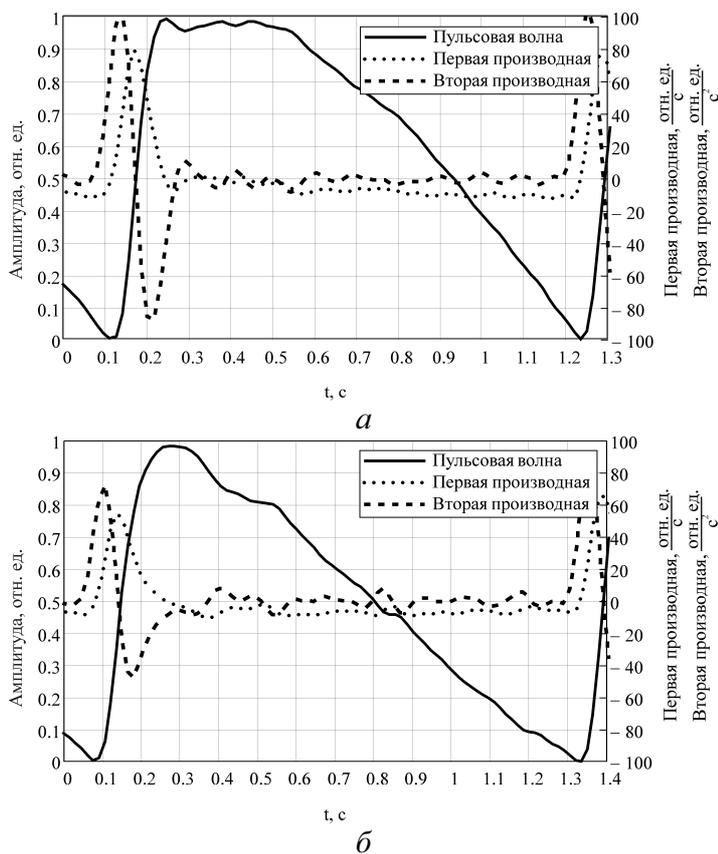


Рисунок 11 – Примеры пульсовых волн с отклонениями формы:
а – обследуемый №2, *б* – обследуемый №3.

формы пульсовой волны в сочетании с оценкой типа вегетативной регуляции можно сделать вывод о риске возникновения острой сосудистой недостаточности.

Номер обследуемого	Π_1	Π_2	Π_3
1	0.19	0.23	27
2	0.1	0.17	7.1
3	0.09	0.11	10.8

сигналу полупроводникового лазера. На рисунке 12 приведены измеренный автодинный сигнал и восстановленная из него форма пульсовой волны.

Таблица 2

При работе автодинной системы в режиме слабой обратной связи автодинный сигнал приобретает наклон, характеризующий направление движение отражателя. Это позволило решить проблему определения направления движения стенки лучевой артерии при восстановлении функции движения.

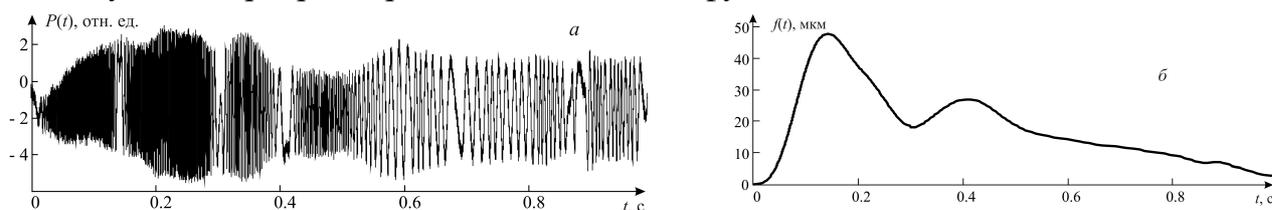


Рисунок 12 – Измеренный автодинный сигнал $P(t)$ – *а*, и восстановленная из него функция движения $f(t)$ лучевой артерии в области запястья – *б*.

Уменьшение среднего значения второй производной пульсовой волны характеризует уменьшение кривизны формы пульсовой волны и свидетельствует о приближении формы на этом участке к линейному виду, что связано с отклонений в деятельности сосудистой системы

В таблице 2 приведены вычисленные параметры Π_1 , Π_2 и Π_3 для трех обследуемых, формы пульсовых волн которых приведены на рисунках 10 и 11.

Активность вегетативной регуляции каждого обследуемого определялась по изменению длительности интервалов пульсовой волны и рассчитанным показателям хронотропной структуры сердечного ритма – индексам Баевского.

По вычисленным параметрам были проведены эксперименты по определению формы пульсовой волны лучевой артерии в области запястья по автодинному

сигналу полупроводникового лазера. На рисунке 12 приведены измеренный автодинный сигнал и восстановленная из него форма пульсовой волны.

Примеры пульсовых волн испытуемых А. и Б., восстановленные из измеренных автодинных сигналов, приведены на рисунке 13 (сплошная линия).

Также были проведены измерения пульсовых волн этих испытуемых с помощью пневматического датчика давления (рисунок 13, штриховые линии).

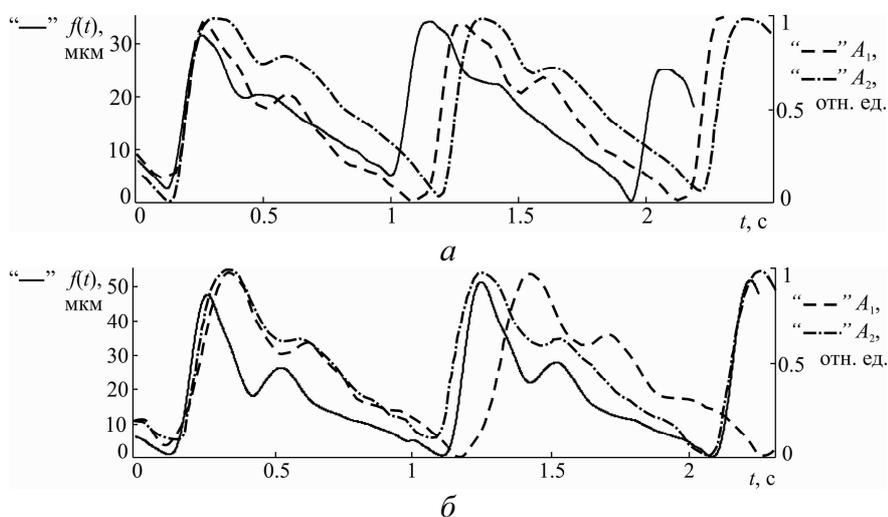


Рисунок 13 – Формы пульсовых волн: *а* – испытуемый А., *б* – испытуемый Б.; $f(t)$ – форма пульсовой волны, полученная с помощью автодинной системы; A_1 и A_2 – формы пульсовых волн, измеренные с помощью пневматического датчика при давлении 50 и 70 мм рт. ст. соответственно.

Как следует из результатов, приведенных на рисунке 13, формы пульсовых волн, измеренных разными методами имеют отличия. Это может быть объяснено тем, что лазерный автодинный метод является бесконтактным, тогда как метод, основанный на использовании пневматического датчика давления, контактный, т.е. с ростом давления в манжете (с увеличением воздействия

на пульсирующую артерию) форма пульсовой волны может искажаться.

Из анализа рассчитанных по восстановленным формам пульсовых волн параметрам Π_1 , Π_2 и Π_3 и индексам Баевского была сделана оценка отсутствия риска возникновения острой сосудистой недостаточности у испытуемых А. и Б..

Таким образом, в работе описан метод восстановления формы пульсовой волны лучевой артерии по сигналу лазерного автодина с учетом уровня внешней оптической обратной связи.

Показана возможность применения параметров формы пульсовой волны и измеренной вариабельность сердечного ритма для оценки степень риска возникновения острой сосудистой недостаточности.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Исследовано влияние уровня внешней оптической обратной связи на спектр автодинного сигнала при нановибрациях. Разработан метод определения амплитуды нановибраций объекта по автодинному сигналу полупроводникового лазера с учетом уровня внешней оптической обратной связи, основанный на измерении величины первой гармоники спектра автодинного сигнала, нормированной на ее максимальное значение, соответствующее известной амплитуде вибраций и измеряемое при изменении амплитуды возбуждаемых дополнительно механических колебаний. Показано, что предложенный метод позволяет значитель-

но повысить точность измерений амплитуд нановибраций при учете уровня внешней оптической обратной связи.

2. Исследовано влияния внешней оптической обратной связи на форму автодинного сигнала полупроводникового лазера при неравномерно ускоренных микросмещениях объекта. Показано, что учет уровня внешней оптической обратной связи в автодинном сигнале позволяет повысить точность определения изменяющегося во времени ускорения при неравномерно ускоренных микросмещениях объекта. При этом, среднеквадратическое отклонение ускорения от аппроксимирующей линейной зависимости заметно меньше при учете уровня обратной связи.

3. Рассмотрена возможность использования полупроводникового лазерного автодина для определения формы пульсовой волны лучевой артерии человека. Показано, что форма пульсовой волны лучевой артерии человека с учетом направления смещения стенки лучевой артерии может быть восстановлена по автодинному сигналу полупроводникового лазера при учете влияния внешней оптической обратной связи. Установлено, что существенное отличие формы пульсовой волны, восстановленной по сигналу лазерного автодина и с использованием пневматического датчика давления, обусловлено зависимостью формы пульсовой волны от давления в окклюзионной манжете, и отличием в принципе измерения с помощью автодинной системы, позволяющей проводить бесконтактные измерения при отсутствии давления контактирующего датчика на измеряемую область.

4. Проведенные исследования показали, что восстановленная форма пульсовой волны из автодинного сигнала полупроводникового лазера коррелирует с пульсовой волной, измеренной с помощью датчика давления. Восстановленная форма пульсовой волны и измеренная вариабельность сердечного ритма характеризуют степень риска возникновения острой сосудистой недостаточности.

Основные результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК

1. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Кацавцев Е.О., Калинин М.Ю.* Измерение амплитуды нановибраций с помощью полупроводникового лазерного автодина с учетом влияния обратной связи // Письма в ЖТФ. 2012. Том 38, № 12. С. 81-86.

2. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Кацавцев Е.О., Калинин М.Ю.* Определение амплитуды нановибраций с помощью полупроводникового лазерного автодина с учетом внешней оптической обратной связи // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 9. С. 43-49.

3. *Усанов Д.А., Протопопов А.А., Бугаева И.О., Скрипаль А.В., Аверьянов А.П., Вагарин А.Ю., Сагайдачный А.А., Кацавцев Е.О.* Устройство оценки риска возникновения сердечно-сосудистой недостаточности при физической нагрузке // Медицинская техника, 2012. №2. С. 34-37.

Тезисы докладов на конференциях

4. *Dmitry A. Usanov, Anatoly V. Skripal, Evgenii O. Kashchavtcev, and Michael Yu. Kalinkin* Nanovibration amplitude measurement using semiconductor laser auto-dyne // 10th International Conference on Vibration Measurements by Laser and Non-contact Techniques - AIVELA 2012/ AIP Conf. Proc. 1457. 2012 P. 156-161

5. *Кащавцев Е.О., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Добдин С.Ю.* Метод определения ускорения при микро- и наносмещениях объекта по сигналу лазерного автодина с учетом влияния внешней оптической обратной связи // Тезисы докладов VII Всероссийской конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанопотоника и нелинейная физика». – Саратов: Изд-во. Саратов. ун.-та. 2012. С. 71-72.

6. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Кащавцев Е.О.* Измерение микросмещений лучевой артерии при прохождении пульсовой волны полупроводниковым лазерным автодином // Материалы Всероссийской молодежной конференции «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине – 2012». – Саратов: Изд-во Саратов. ун.-та, 2007. С. 221-224.

7. *Добдин С.Ю., Кащавцев Е.О., Астахов Е.И.* Лазерный автодинный измеритель параметров нановибраций, расстояния и ускорений при наносмещениях // Седьмой Саратовский Салон изобретений, инноваций и инвестиций г. Саратов. 20-22 марта 2012. С.59.

8. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Кащавцев Е.О., Калинин М.Ю.* Метод определения амплитуд нановибраций по сигналу лазерного автодина с учетом влияния внешней оптической обратной связи // Труды XV-той Международной конференции «Опто-, наноэлектроника, Нанотехнологии и микросистемы» – Ульяновск: УлГУ, 2012. С. 258-259.

9. *Усанов Д.А., Протопопов А.А., Скрипаль А.В., Аверьянов А.П., Сагайдачный А.А., Кащавцев Е.О.* Скрининг-диагностика состояния сердечно-сосудистой системы юных спортсменов // V Троицкая конференция «Медицинская физика и инновации в медицине» 4-8 июня 2012 г. г. Троицк Московской области. С. 415-417.

Подписано в печать 23.11.2012. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная
Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл.-печ. л. 1.0
Тираж 100 экз. Заказ 300-Т.

Типография Саратовского университета.
410012, Саратов, Б. Казачья, 112А.