

На правах рукописи

ВЛАСЕНКО МАРИЯ ЮРЬЕВНА

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ КОРРЕЛЯЦИОННО – СПЕКТРАЛЬНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ДЛЯ РОБАСТНОГО
ОЦЕНИВАНИЯ МГНОВЕННОЙ ЧАСТОТЫ**

Специальность 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации,
статистика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: **Лабунец Леонид Витальевич**
доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры автономных информационных и управляющих систем МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Чопоров Олег Николаевич,**
доктор технических наук, профессор, проректор по цифровой трансформации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный медицинский университет имени Н.Н. Бурденко» Министерства здравоохранения Российской Федерации

Судаков Владимир Анатольевич,
доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела №16, Федеральное государственное учреждение "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук"

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Защита диссертации состоится «24» февраля 2026 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.331.14 по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный переулок, д. 10, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1 на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «__» _____ 202__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.14,
кандидат технических наук

Глазков Виталий Владимирович

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Изучение волновых процессов, изменение которых обусловлено факторами, скрытыми от наблюдателя, позволяет формировать модели сложных явлений, происходящих в окружающем мире. Как правило, исходная информация для изучения подобных процессов представлена нестационарными временными рядами, анализ которых позволяет выявлять закономерности, скрытые в данных.

Практическую значимость представляет анализ волновых процессов, влияющих на аспекты жизни общества, например динамики вибраций, биологических показателей, экономических индексов, и многих других. Изучение спектральных характеристик квазипериодических колебаний позволяет определять пограничные состояния систем, распознавать объекты, формировать прогностические данные, в том числе делает возможным:

1. Исследование механизма сейсмической активности, повышение надёжности долгосрочных сейсмических прогнозов;
2. Формирование прогностических моделей поведения финансового рынка и анализа сезонных колебаний;
3. Защиту гражданских и специальных объектов от несанкционированного проникновения малоразмерных БПЛА;
4. Распознавание биологических объектов по акустическим волнам, например пению птиц;
5. Определение частоты пульса и дыхательной волны как гармоник квазипериодической волны.

В решении задачи оценки параметров волновых процессов важную роль играет формирование пространства информативных признаков на основе интеллектуального анализа исходных данных. Основой системного подхода к решению данной проблемы является применение методологии искусственного интеллекта, обеспечивающего естественный симбиоз нетривиальных методов, моделей и алгоритмов структурной декомпозиции и корреляционно-спектрального анализа динамики нестационарных временных рядов. Важной особенностью системного подхода является инвариантность применяемой методологии к содержанию предметной области.

Хотя в рамках диссертации приводится анализ волновых процессов на примере данных, зарегистрированных методом дистанционной фотоплетизмографии (ДФПГ), предлагаемые методы, модели и алгоритмы также могут быть применены и в других предметных областях.

Актуальность темы исследования обусловлена растущим интересом к дистанционным технологиям обнаружения закономерностей скрытых в динамике волновых процессов. Выбор исходных данных для исследования определен растущим спросом на телемедицину, носимые устройства, непреодолимой необходимостью диагностики физического состояния человека.

Подходы, основанные на внедрении методов интеллектуального анализа данных (ИАД) при исследовании характеристик квазипериодической волны, измеренной дистанционным методом, предоставляют уникальные возможности для изучения нестационарных волновых процессов в альтернативных предметных областях.

Научной задачей исследования является разработка методов и алгоритмов оценки динамики мгновенной частоты квазипериодической волны, обладающих общностью подхода для анализа различных предметных областей, а также валидация предлагаемых подходов на экспериментальных данных.

Степень разработанности темы характеризуется результатами предшествующих исследований, изложенных в публикациях: Стрижов В.В., Мотренко А.П. – акселерометрия движения человека методами биомеханики; Алексеев В.В., Калякин И.В. – обнаружение аномальных сигналов виброметрии методами скользящего дискретного вейвлет преобразования; Самородов А.В., Шукин С.И. – неинвазивные технологии диагностики и терапии, интеллектуальные алгоритмы обработки сигналов; Крупаткин А.И. – корреляционно – спектральный анализ волновых процессов методом лазерной доплеровской флоуметрии; Анциперов В.Е., Данилычев М.В., Мансуров Г.К. – алгоритмическое и аппаратное исследование динамики артериального давления; Федотов А.А., Акулов С.А. – методы математического анализа variability сердечного ритма; Баевский Р.М. – исследование процессов кровообращения и оценка параметров пульсовой волны; Wang W., Den Brinker A.C., Stuijk S., De Naan G. – алгоритмические принципы формирования пульсовой волны методами цифровой фильтрации сигналов ДФПГ; Бороноев В.В., Гармаев Б.З., Омпоков В.Д. – частотно- временной анализ сигналов контактной фотоплетизмографии (ФПГ), измеренных методами тибетской медицины; Лабунец Л.В., Макарова Н.Ю. – интеллектуальный анализ биологических сигналов методами структурной декомпозиции.

Предлагаемые в приведенных выше работах методы вейвлет анализа и корреляционно-спектрального анализа данных применяются для конкретных предметных областей. Вместе с тем, в полном объеме в них не представлены инвариантные к предметной области алгоритмы оценки мгновенной частоты квазипериодической волны на основе интеллектуального анализа сигналов, рассматриваемые в настоящей диссертации.

Целью диссертации является разработка и исследование методических, алгоритмических и программных средств анализа динамики мгновенной частоты как части информационной системы, инвариантной к предметной области на примере обработки информации, полученной методом дистанционной фотоплетизмографии.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением следующих задач, составляющих **основные этапы исследования**:

1. Разработка параметрической математической модели контроля изменения характеристик отражения кожных покровов лица человека, исследование алгоритма выделения области интереса.

2. Формирование и исследование квазипериодической волны на основе экспертной модели, ее валидация и параметризация. Разработка методики структурной декомпозиции нестационарных временных рядов для выделения информации, скрытой в динамике данных.

3. Разработка алгоритмов выделения спектральных составляющих нестационарного временного ряда квазипериодической волны. Разработка алгоритмов для обеспечения работы предложенной модели обработки сигнала и оценки мгновенной частоты квазипериодической волны. Проектирование и инсталляция программного обеспечения на базе разработанных алгоритмов.

4. Апробация и валидация разработанных моделей и алгоритмов формирования устойчивых статистик параметров временного ряда мгновенных частот квазипериодической волны.

Положения, выносимые на защиту

1. Функциональная схема системы интеллектуального анализа данных, которая позволяет сформировать единый облик аппаратно-программного комплекса и определить структурные связи между блоками обработки информации.

2. Методика формирования экспертной модели квазипериодической волны на основе многооконных периодограммных оценок энергетического спектра и алгоритмов скользящего кратномасштабного разложения нестационарных временных рядов (НВР), которая позволяет определить компоненты квазипериодической волны в предопределенном частотном диапазоне.

3. Методика удаления обертонов квазипериодической волны с использованием скользящего сингулярного анализа, алгоритмы оценки мгновенной частоты квазипериодической волны при помощи скользящего корреляционно-спектрального анализа ее информативных структурных компонент, которые позволяют сформировать оценку динамики мгновенной частоты.

4. Семейство адаптивных моделей и алгоритмов робастного оценивания мгновенной частоты основной гармоник квазипериодической волны на основе дискретного преобразования Гильберта и морфологических характеристик информативных структурных компонент, которые позволяют сократить вычислительные ресурсы и обеспечить необходимую точность оценки динамики мгновенной частоты квазипериодической волны.

5. Валидация и результаты экспериментального применения предложенных в работе алгоритмов, которые позволяют провести сравнительный анализ предлагаемых решений с альтернативными существующими подходами.

Методы исследования. Представленные в диссертационной работе теоретические результаты получены на основе применения методов кратномасштабного анализа нестационарных временных рядов (НВР) в базе быстрого дискретного вейвлет-преобразования, теории робастного оценивания трендов, мер волатильности и одномерных вероятностных распределений, цифрового многооконного корреляционно-спектрального анализа НВР, скользящего сингулярного спектрального анализа НВР методом «Гусеница», морфологического анализа динамики квазипериодических НВР, теории цифровой обработки данных, методов численного дифференцирования развернутой мгновенной фазы, методологии интеллектуального анализа данных (ИАД).

Объектом исследования являются корреляционно-спектральные характеристики нестационарных узкополосных волновых процессов, полученных дистанционным методом, в частности, мгновенная частота квазипериодической волны.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы ИАД для формирования робастных оценок мгновенной частоты квазипериодической волны, измеренной дистанционным методом.

Научная новизна полученных в диссертационной работе результатов состоит в следующем:

1. Реализован естественный симбиоз цифровых моделей и алгоритмов, дополняющих друг друга корреляционно-спектрального, кратномасштабного и скользящего сингулярного анализа для обнаружения закономерностей скрытых в нестационарной динамике параметров квазипериодической волны, измеренной дистанционным методом. Данный подход отличается системностью, а также инвариантностью к предметной области.

2. Предложена структура системы регистрации и обработки информации, содержащейся в квазипериодических колебаниях отраженного кожей света.

3. Разработана экспертная модель агрегированной квазипериодической волны сигналов дистанционной фотоплетизмографии на основе нормализованного цветового пространства YC_bCr , отличающаяся простотой реализации и обеспечивающая сохранение локальных особенностей сигналов дистанционной фотоплетизмографии, в условиях нестационарной динамики биологических процессов.

4. Разработаны и верифицированы адаптивные робастные алгоритмы оценивания мгновенной частоты квазипериодической волны, измеренной дистанционным методом, которые в отличие от распространенных на практике позволяют получать несмещенные оценки мгновенной частоты.

Практическая значимость работы заключается в разработке комплекса средств распознавания характерных особенностей квазипериодической волны, измеренной дистанционным методом. Результаты исследования имеют

значительный потенциал для применения в медицинской диагностике и системах мониторинга физиологических показателей, а также могут быть адаптированы для анализа квазипериодических временных рядов, относящихся к другой предметной области, например динамики вибраций или акселерометрии движения человека. Перспективным направлением дальнейших исследований является расширение предложенной модели на системы, работающие в реальном времени и формирование характеристик нестационарных временных рядов с минимальным временем вычисления. Разработанные модели и алгоритмы обеспечивают адекватный анализ параметров квазипериодической волны неконтактными методами исследования эффективными по соотношению цена/качество. Предложенное семейство моделей и алгоритмов поддерживает программную реализацию на различных платформах, включая персональные мобильные устройства.

Достоверность полученных результатов подтверждается применением ранее полученных фундаментальных результатов; корректным использованием апробированного математического аппарата; сопоставлением результатов, полученных различными проверенными на практике методами; анализом факторов, влияющих на изучаемые процессы; наличием достоверных экспериментальных данных, согласованностью полученных непротиворечивых результатов с исследованиями, опубликованными в открытой печати.

Реализация результатов работы. Разработанные методы, модели и алгоритмы применяются в учебном процессе МГТУ им. Н.Э. Баумана по дисциплинам «Основы теории и техники обработки информации в ракетно-космической технике»; «Математическое и имитационное моделирование». Разработанные программные решения были использованы в процессе выполнения ОКР «Разработка новых медицинских изделий хирургического дилататора и диагностического сфинктерометра на основе макетного образца расширителя ТДА-04» в Московском филиале АО «НПО «Поиск». Соответствующие использования результатов диссертации подтверждаются актами.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на следующих международных конференциях:

- Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems 2021 (Москва, 2021);
- 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE) (Москва, 2024);
- 26th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA) (Москва, 2024);
- 2024 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT) (Екатеринбург, 2024).

Результаты работы также были представлены на семинарах:

— Математическое и компьютерное моделирование распространения, фокусировки и рассеяния электромагнитных волн в задачах радиосвязи, радиолокации, радионавигации, а также при дистанционном зондировании природных и искусственных сред (РосНОУ, Москва, 2025);

— Биомедицинская радиоэлектроника и информатика (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва, 2025).

Личный вклад и публикации. Исследования, результаты которых изложены в диссертации, проведены соискателем совместно с научным руководителем в процессе совместной научной деятельности. В совместных работах автору принадлежат результаты в равных долях. Существующие теоретические подходы и методы, положенные в основу разработанных моделей и алгоритмов, сопровождаются ссылками на оригинальные источники. Соискателем лично разработаны программно-алгоритмические решения для оценки динамики мгновенных частот, функциональное моделирование аппаратно-программного комплекса, выполнен анализ этих решений на основе экспериментов. По результатам подготовки диссертации автором зарегистрированы 3 программы для ЭВМ, опубликовано 8 научных работ (общим объемом 3,99 п.л.), из них 4 работы в изданиях, входящих в перечень ВАК при Минобрнауки России или приравненных к нему, 4 работы в трудах международных конференций.

Объем и структура работы. Структура: введение, четыре главы, заключение. Содержит 114 страниц, 52 рисунка, 10 таблиц и 103 наименования в списке литературы.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы цель и задачи диссертационной работы, обоснована ее актуальность. Приведен методологический аппарат, используемый для достижения поставленной цели. Сформулированы основные результаты и положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведено описание обобщенной математической модели квазипериодической волны, рассматриваются области возникновения такого рода колебаний. Исследование квазипериодических колебаний имеет фундаментальное значение для понимания динамики сложных процессов в окружающем мире. Практическую значимость представляет анализ волновых процессов, влияющих на аспекты жизни общества, например динамики вибраций, активов фондовых рынков, биологических показателей и многих других.

Функция $x(t)$ является квазипериодической, если ее можно представить в виде

$$x(t) = f(\omega_1 t, \omega_2 t \dots \omega_n t), \quad (1)$$

где $f(\omega t)$ – периодическая функция по каждому аргументу $\Theta_k = \omega_k t$, а частоты ω_k являются несоизмеримыми, т.е. любые две частоты находятся в иррациональном соотношении.

В случае реальных процессов подобные колебания содержат дрейф частот и колебания амплитуд, а также трендовую и сезонную компоненты. В случае изменения параметров одного компонента и аддитивных тренда и сезонной компонент выражение для квазигармонического колебания можно представить следующим образом

$$x(t) = A(t)\cos(\omega_1(t)t + \phi_1) + B\cos(\omega_2 t + \phi_2) + trend + season, \quad (2)$$

где A, B – амплитуды,

ϕ_1, ϕ_2 – фазы.

Системный подход к анализу информации, скрытой в квазипериодических колебаниях, обеспечивают методы структурной декомпозиции. Практически значимые примеры применения методики в таких областях как радиолокационные измерения георадарным методом, акселерометрия движения человека методами биомеханики; обнаружение аномальных сигналов виброметрии методами скользящего дискретного вейвлет преобразования, измерение пульсовой и дыхательной волн методом фотоплетизмографии демонстрируют инвариантность подхода к содержанию предметной области.

Особый интерес представляет анализ биологических волновых процессов в организме человека – пульсовой, дыхательной, миогенной и др. волн. Проведение исследования, направленного на разработку алгоритмического и программного обеспечения для экспресс-диагностики методом фотоплетизмографии (ФПГ), является актуальным в связи с растущим спросом на телемедицину, носимые устройства, непреодолимой необходимостью диагностики физического состояния человека.

Оценка и формирование характеристик квазипериодической волны, измеренной методомДФПГ, требует адекватного выделения и слежения за областью интереса, а также применения адаптивных алгоритмов интеллектуального анализа данных. Решение данных задач может быть выполнено посредством системы анализа данных (Рисунок 1).

Данная система реализует вычисление максимально полных и достоверных оценок параметров волновых процессов. Серыми блоками на схеме обозначена аппаратная часть системы, блоки без заливки отображают внешнюю среду.

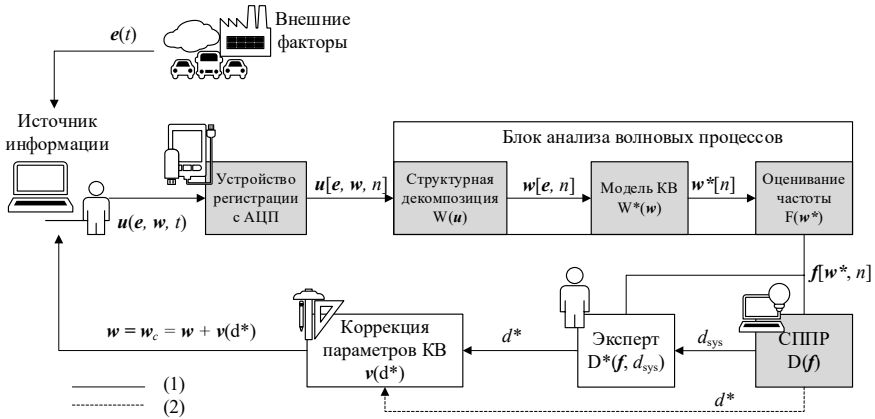


Рисунок 1 – Функциональная схема системы анализа данных

Переход от физического непрерывного сигнала к его дискретной модели реализует отображение

$$u(e, w, t) \rightarrow u[e, w, n], \quad (3)$$

где u – массив изменяющихся во времени показателей исследуемой системы,
 w – совокупность квазипериодических волновых процессов системы,
 e – совокупность внешних факторов среды,
 t – аналоговое время,
 n – дискретные отсчеты времени.

Принцип работы системы анализа данных может быть описан следующим образом. Квазипериодическая волна w несет в себе характеристики состояния системы f , которые, в свою очередь подвергаются анализу со стороны блока анализа параметров волновых процессов. Блок анализа волновых процессов, в свою очередь, состоит из блока структурной декомпозиции, блока формирования КВ согласно экспертной модели w^* , блока вычисления оценки мгновенной частоты. Данные анализа $f[w^*, n]$ поступают в цепь обработки информации.

Отдельным блоком может быть вынесена система поддержки принятия решений (СППР) $D(f)$, которая находится между блоком анализа волновых процессов и экспертом, как дополнительное средство контроля состояния испытуемого (линия 1 на Рисунке 1). В случае отсутствия эксперта СППР выступает единственным элементом цепи обработки информации (линия 2 на Рисунке 1).

Внесение блока коррекции параметров в цепь обратной связи системы позволяет вносить необходимые изменения $v(d^*)$ в параметры КВ согласно решению эксперта $d^* = D^*(f, d_{sys})$, где $d_{sys} = D(f)$ – прогностические данные СППР. С учетом влияния внешних факторов обновленный вектор волновых параметров системы выглядит следующим образом $w_c = w + v(d^*)$.

Примем за устойчивое состояние данной системы такое, при котором $\mathbf{w} = \mathbf{w}_0$ – совокупность параметров объекта анализа, удовлетворяющее критериям решения «нормальное». В таком случае значение коррекции $v(d^*) = 0$.

Наличие отклонения $\Delta \mathbf{w} = \mathbf{w}_0 - \mathbf{w}_c$ приводит к изменению параметра корректировки $\Delta v = v(\Delta d^*)$, где $\Delta d^* = D^*(f[\mathbf{w}^* + \Delta \mathbf{w}, n], \Delta d_{sys}) - D^*(f[\mathbf{w}^*, n], \Delta d_{sys})$, $\Delta d_{sys} = D(f[\mathbf{w}^* + \Delta \mathbf{w}, n]) - D(f[\mathbf{w}^*, n])$.

При успешной реализации процедуры коррекции состояния системы отклонение $\Delta \mathbf{w}$ стремится к нулю.

В данной работе особый интерес представляет блок анализа параметров волновых процессов. В данном блоке производится оценка динамики мгновенной частоты цифрового сигнала, содержащая информацию о параметрах квазипериодической волны.

Вторая глава посвящена оценке параметров квазипериодической волны методами интеллектуального анализа фотоплетизмограммы. Представлены логически связанные этапы исследования зашумленных и искаженных артефактами нестационарных временных рядов (НВР), полученных методом дистанционной фотоплетизмографии.

В работе использованы временные ряды, сформированные на основе записей БД Технологического Университета Эйндховен, отражающие некоторые особенности, которые позволяют изучать поведение разрабатываемых алгоритмов в сложных условиях. Применяемая БД апробирована, открыта и предназначена для изучения методов ДФПГ мировым сообществом. В базе данных каждому примеру назначены буквенно-численные коды, приведенные далее. Пример **P1LC3** содержит запись испытуемого в стационарных условиях освещения, с пульсом состояния покоя, зафиксированным лицом. Для примера **P1N1** условия записи аналогичные, но перед записью испытуемый выполняет физические упражнения, что приводит к увеличению интенсивности дыхания, увеличению частоты пульса с дальнейшей его нормализацией за время записи. Запись **P1M3** отличается от **P1LC3** ритмичными качаниями головы испытуемого на частоте превышающий пульс на 0,5 Гц.

Формирование НВР квазипериодической волны производится на основе RGB видеозаписи, а именно временных рядов изменения яркостей цветовых каналов в пределах области интереса (область лица) (Рисунок 2).

$$\mathbf{w}_{RGB}(n) = [w_R(n) \ w_G(n) \ w_B(n)]^T = \frac{1}{ROI} \sum_{i,j \in ROI} [r_{i,j}(n) g_{i,j}(n) b_{i,j}(n)]^T, \quad (4)$$

где n – номер кадра в видео,

$\mathbf{w}_{RGB}(n)$ – вектор сигналов квазипериодической волны,

$w_R(n), w_G(n), w_B(n)$ – НВР, соответствующие цветовым каналам изображения – красному (R), зеленому (G) и синему (B),

ROI – пиксели области интереса,

$r_{i,j}(n), g_{i,j}(n), b_{i,j}(n) - i, j$ -й пиксели из области ROI, соответствующие цветовым каналам изображения – красному (r), зеленому (g) и синему (b).

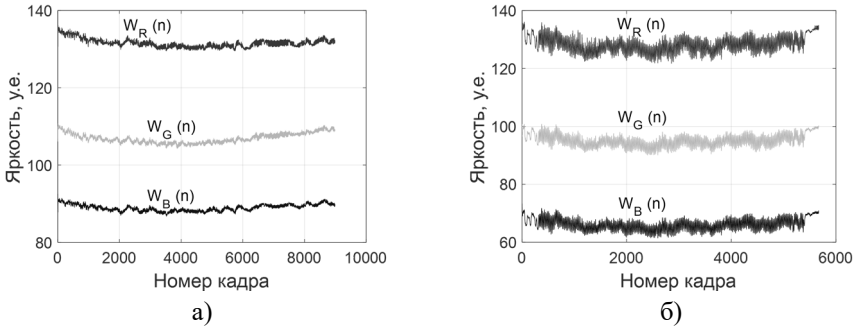


Рисунок 2 – Временные ряды $w_R(n), w_G(n), w_B(n)$ цветowych каналов изображения лица в кадре для примеров: а) P1N1; б) P1M3

Полученные НБР, помимо исследуемой квазициклической компоненты, содержат некоторые артефакты в виде аномалий и помеховых составляющих. Наличие последних обусловлено условиями освещенности, характеристиками отражения и поглощения света кожей, наличием схожих с цветом кожи фоновых объектов, а также движениями испытуемого. Эффективное удаление выбросов обеспечивает медианная фильтрация НБР $w_R(n), w_G(n), w_B(n)$ цветowych каналов $\tilde{w}_{R,G,B}(n) = w_{R,G,B}(n) - \text{medfilt}\{w_{R,G,B}(n)\}$. Апертура фильтра согласована с интервалом временной дискретизации НБР $\Delta t = 1/30$ с и нижней границей $f_{\min} = 0,15$ Гц частотного диапазона исследуемой волны в соответствии с величиной $1/(\Delta t f_{\min}) = 201$.

Кратномасштабный анализ (КМА) динамики НБР в базисе вейвлетов Добеши 40-го порядка в сочетании с многооконными периодограммными оценками Томсона обеспечивают адекватное разложение с высоким частотным разрешением НБР цветowych каналов ДФПГ по спектральным компонентам квазипериодической волны в predeterminedной полосе частот от 0,667 до 4 Гц, обусловленной динамикой работы сердца и движения крови. Неочищенные сигналы \tilde{w}_C цветowych каналов ДФПГ, где индекс C – обозначение канала R, G или B, рассматриваются как аддитивные совокупности нескольких составляющих – трендов, квазициклических компонент, локальных особенностей, а также шумов.

Спектральные оценки демонстрируют локализацию СПМ детализирующих компонент сигналов цветowych каналов, в predeterminedном диапазоне частот (0,667...4 Гц) как целиком для третьей $d_C(n,3)$ и четвертой $d_C(n,4)$ компонент, так и частично для второй $d_C(n,2)$ и пятой $d_C(n,5)$ компонент (Рисунок 3). Также на Рисунке 3 видно, что части второй и пятой

компонент расположены за пределами диапазона. Серой линией обозначены периодограммные оценки СПМ с оптимальным окном данных Блэкмана-Харриса, черной – многооконная периодограммная оценка Томсона.

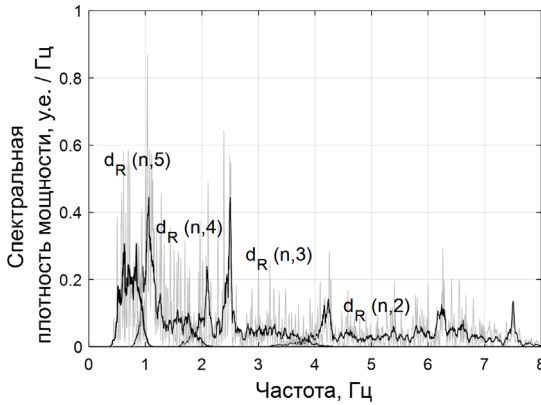


Рисунок 3 – Спектральные оценки от детализирующей компоненты $d_R(n, 2)$ до детализирующей компоненты $d_R(n, 5)$ разложения НБР $\tilde{w}_R(n)$ для примера P1LC3

Для данных компонент дополнительно производится усечение полосы частот методом аналитической модовой декомпозиции (АМД). Сочетание КМА и АМД в рамках структурной декомпозиции дает возможность устранить эффект перемешивания спектров детализирующих и аппроксимирующих составляющих, что позволяет рассматривать компоненты разложения как некоррелированные. Экспертная модель квазипериодической волны цветового канала в рамках системного подхода к оценке структурных составляющих принимает следующий вид

$$w_{PWC}(n) = d_C^s(n, 2) + d_C(n, 3) + d_C(n, 4) + d_C^f(n, 5), C = R, G, B, \quad (5)$$

где $d_C^s(n, 2)$ – «медленная» часть второй детализирующей компоненты,

$d_C(n, 3)$, $d_C(n, 4)$ – детализирующие компоненты 3го и 4го уровня разложения соответственно,

$d_C^f(n, 5)$ – «быстрая» часть пятой детализирующей компоненты.

Восьмая $d_C(n, 8)$, девятая $d_C(n, 9)$, десятая $d_C(n, 10)$ детализирующие компоненты, а также десятая аппроксимирующая компонента КМА $a_C(n, 10)$ позволяют сформировать экспертную модель трендовой составляющей квазипериодической волны, а именно $trend_C = d_C(n, 8) + d_C(n, 9) + d_C(n, 10) + a_C(n, 10)$.

Экспертная модель квазипериодической волны (Рисунок 4) формируется при помощи агрегирования НВР цветовых компонент в соответствии с выбранной моделью

$$w_{Cr}^* = (112w_{PWR} - 93.8w_{PWG} - 18.2w_{PWB})/255, \quad (6)$$

где w_{Cr}^* – экспертная модель квазипериодической волны,

w_{PWR} , w_{PWG} , w_{PWB} – предварительные оценки квазипериодической волны по цветовым каналам RGB.

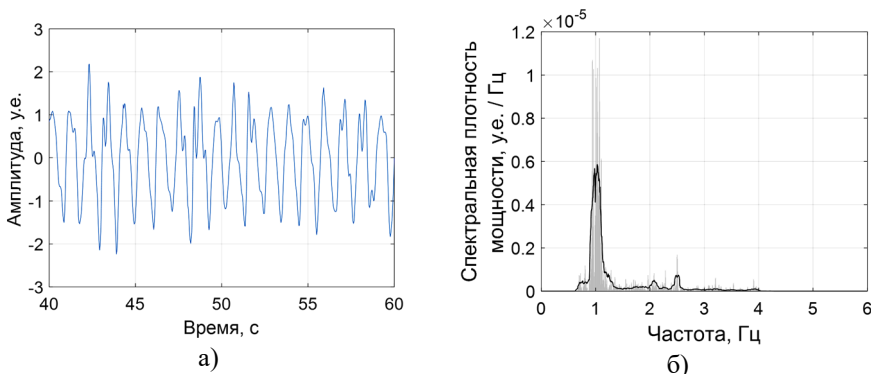


Рисунок 4 – Оценка квазипериодической волны w_{Cr} для примера P1LC3:
а) во временной области; б) спектральная оценка

Данная оценка квазипериодической волны может быть смещена относительно нуля, а также может содержать аномальные значения. Для дальнейшего анализа целесообразным является центрирование, удаление выбросов и нормировка временного ряда, что позволяет получить центрированную и нормированную оценку квазипериодической волны w_{Cr} .

Анализ динамики изменения спектральных характеристик производится разбиением НВР на перекрывающиеся сегменты и анализом каждого из них. Скользящий спектрально-корреляционный анализ предварительной оценки квазипериодической волны учитывает нестационарный характер динамики сигнала, т.е. позволяет производить оценку динамики мгновенной частоты как максимума периодограммной оценки. Дискретное преобразование Гильберта положительно определенной коррелограммной оценки, нормированной по огибающей автокорреляционной функции, позволяет определять непрерывные неубывающие компоненты развернутой мгновенной фазы и соответственно мгновенной частоты сегментов квазипериодической волны.

В третьей главе изложены альтернативные методы оценки мгновенной частоты квазипериодической волны на основе скользящего анализа корреляционно-спектральных характеристик НВР, интеллектуального анализа квадратурных составляющих сигнала, а также непосредственно по реализации

квазипериодической волны, измеренной методом ДФПГ. Логически связанные этапы формирования информативных составляющих НВР позволяют исследовать нестационарную динамику оценки мгновенной частоты.

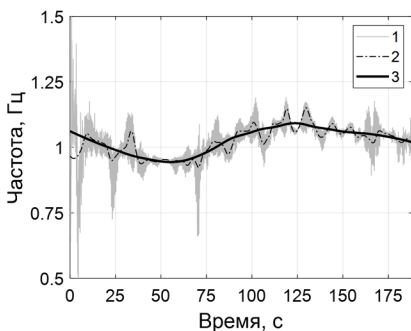
Скользящий корреляционный анализ демонстрирует наличие обертонов в зашумленном НВР квазипериодической волны, на частотах кратных основной. Удаление такого рода обертонов реализует сингулярный анализ методом «Гусеница». Суммы первой и второй сингулярных троек SVD-разложения траекторных матриц в полной мере сохраняют компоненты основного тона и удаляют помеховые обертоны.

Восстановление первоначальной временной шкалы реализует операция «сшивки» сдвинутых во времени сегментов, на которые для выполнения сингулярного анализа был разбит НВР. В отличие от известного метода агрегирования с помощью скользящего во времени окна сглаживания предлагается метод анализа кластерной структуры ансамбля сегментов очищенной квазипериодической волны, представленных в формате матрицы рассеяния данных. Сшивка сегментов производится на основе оценки центра распределения отрезков сегментов, перекрывающихся в текущий момент времени. Сформированная в результате процедуры сшивки оценка квазипериодической волны $\tilde{w}(n)$ позволяет производить оценку мгновенной частоты с частотой дискретизации исходного НВР.

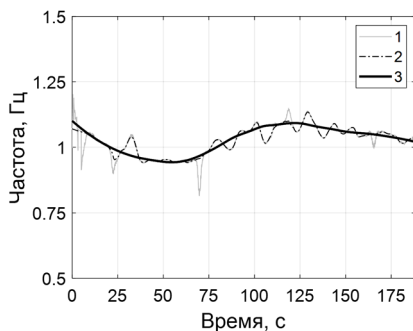
Первый класс оценок формируется на основе преобразования Гильберта НВР и позволяет определять мгновенную частоту в виде:

- $f_{pcont}(t)$ – первой производной сигнала непрерывной неубывающей компоненты развернутой фазы аналитического сигнала (Рисунок 5, а);
- $f_{2pi}(t)$ – прогоны интерполянта Эрмита с шагом 2π для НВР непрерывной неубывающей компоненты развернутой фазы квазипериодической волны в прямом направлении (Рисунок 5, б);
- $f_{pcos}(n), f_{psin}(n)$ – масштабирования квадратур квазипериодической волны ее огибающей и вычисления мгновенных фаз на основе аппроксимации тригонометрическими функциями (Рисунок 5, в, г).

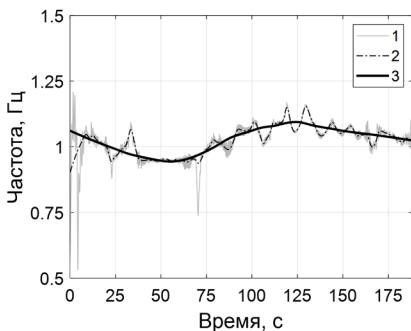
Кривая 1 иллюстрирует динамику оценки частоты, зашумленной ошибками численного дифференцирования с помощью интерполянта Эрмита. Кривые 2 и 3 демонстрируют динамику квазициклической и трендовой компонент.



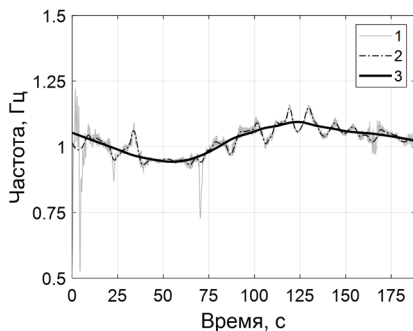
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5 – Оценки мгновенной частоты для примера P1LC3:

а) $f_{pcont}(t)$; б) $f_{2pi}(t)$; в) $f_{pcos}(t)$; г) $f_{psin}(t)$

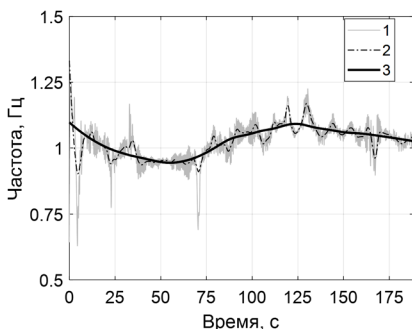
Также исследовался класс морфологических оценок мгновенной частоты полученных непосредственно из квазипериодической волны:

- $f_c(t)$, $f_s(t)$ – первая производная сигнала мгновенных фаз в виде аппроксимации нормированной квазипериодической волны и ее квадратуры тригонометрическими функциями (Рисунок 6, а, б);

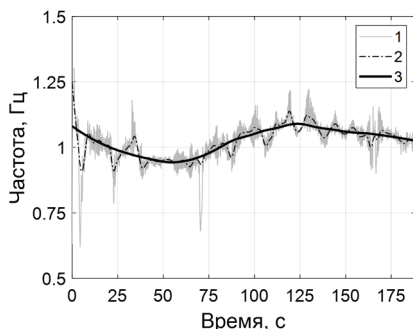
- $f_L(t)$ – длительность интервалов между чередующимися экстремумами нормированной квазипериодической волны и ее квадратуры (Рисунок 6, в);

- $f_T(t)$ – по длительности интервалов между чередующимися превышениями пороговых уровней (Рисунок 6, г).

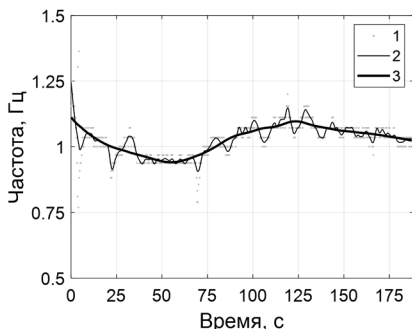
Кривая 1 иллюстрирует динамику оценки частоты, зашумленной ошибками численного дифференцирования с помощью интерполянта Эрмита. Кривые 2 и 3 демонстрируют динамику квазициклической и трендовой компонент.



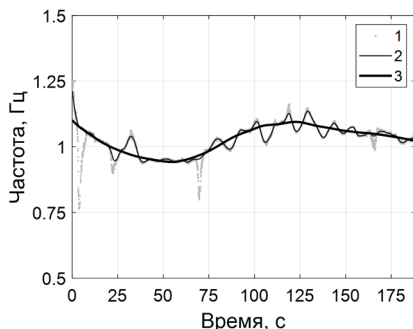
а)



б)



в)



г)

Рисунок 6 – Оценки мгновенной частоты для примера P1LC3:

а) $f_c(t)$; б) $f_s(t)$; в) $f_k(t)$; г) $f_r(t)$

Важное преимущество предложенных оценок по соотношению цена/качество состоит в применении современных алгоритмов цифрового анализа сигналов, эффективно реализуемых в режиме реального времени как алгоритмическими, так и аппаратными средствами.

Четвертая глава посвящена анализу методов, применяемых для выделения квазипериодической волны из фотоплетизмограммы, а также возможности формирования оценок характеристик динамики мгновенных частот.

Различные условия освещенности, наличие движения лица в кадре, вариации цветотипа кожных покровов оказывают негативное влияние на определение мгновенной частоты квазипериодической волны, измеренной методом ДФПГ. Существующие алгоритмы компенсации яркости, расширенный диапазон определения принадлежности пикселя коже, а также усечение спектральной составляющей, обусловленной движением испытуемого, на разных этапах обработки фотоплетизмограммы позволяют уменьшить влияние перечисленных факторов.

Непосредственное сравнение квазициклической компоненты мгновенной частоты волны с полосой, полученной на основе опорных данных кардиограммы, демонстрирует согласованность полученных оценок. Оценки частоты, полученные с помощью ЭКГ в виде полосы шириной 0,1 Гц, а также оценки, полученные с использованием различных алгоритмов вычисления мгновенной частоты квазипериодической волны фотоплетизмограммы, показаны на Рисунке 7.

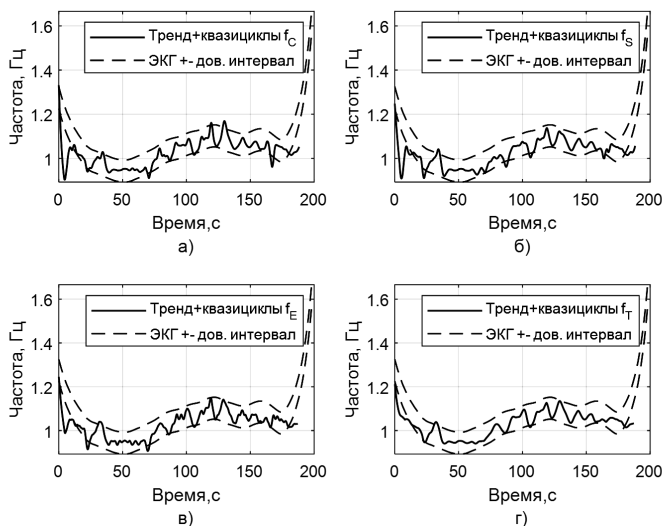


Рисунок 7 – Полосы допустимых отклонений значений частоты от ЭКГ и квазициклические компоненты частоты ДФПГ для примера P1LC3:

а) $f_c(t)$; б) $f_s(t)$; в) $f_e(t)$; г) $f_f(t)$

Экспериментальная оценка полученных результатов производится сравнением метрик для оценок мгновенных частот, представленных в данной работе, а также аналогичных значений, полученных исследователями университета Эйндховен в работе «A Novel Algorithm for Remote Photoplethysmography: Spatial Subspace Rotation» для алгоритмов CHROM и 2SR:

1. Корреляция Пирсона мгновенной частоты. В рамках статистического анализа корреляция рассчитывается для BP RR-интервалов ЭКГ и мгновенных периодов фотоплетизмограммы.

2. Точность мгновенной частоты. «Точность» определяется как отношение числа кадров, где абсолютная разница между рассчитанным и опорным значениями находится в пределах порога T (предел погрешности). В рамках статистического анализа установлен порог T в интервале $[0; 3]$ ударов в минуту.

В Таблицах 1 и 2 приведены значения предыдущих исследований, а также аналогичные показатели для мгновенных частот, рассчитанных предлагаемыми

в данной работе алгоритмами. Полужирным шрифтом выделено лучшее значение в каждой строке, курсивом – второе.

Таблица 1 – Корреляция Пирсона

Условие	CHROM	2SR	RR_{pcont}	RR_{2pi}	RR_E	RR_T
Отсутствие движения	0,95	0,97	0,94	0,95	<i>0,96</i>	0,95
Восстановление частоты	0,73	0,96	<i>0,87</i>	0,86	0,82	0,81
Естественное движение	0,75	0,84	0,56	0,56	<i>0,59</i>	0,58
Среднее значение	<i>0,81</i>	0,92	0,79	0,79	0,79	0,78

Таблица 2 – Точность мгновенной частоты

Условие	CHROM	2SR	RR_{pcont}	RR_{2pi}	RR_E	RR_T
Отсутствие движения	0,82	0,85	0,82	<i>0,83</i>	<i>0,83</i>	<i>0,83</i>
Восстановление частоты	0,35	0,38	<i>0,84</i>	0,85	0,85	0,85
Естественное движение	0,57	0,65	<i>0,94</i>	<i>0,94</i>	0,95	<i>0,94</i>
Среднее значение	0,58	0,63	<i>0,87</i>	<i>0,87</i>	0,88	<i>0,87</i>

Как видно из Таблиц 1 и 2, линейная корреляция выше у методов, предлагаемых в альтернативных исследованиях, однако более точное приближение в терминах абсолютных значений демонстрируют предлагаемые методы и алгоритмы.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты выполненной работы и приведены выводы.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В соответствии с поставленной целью и задачами исследования были достигнуты следующие результаты:

1. Для системного решения задач исследования сформирована обобщенная функциональная модель информационной системы анализа данных, имеющая в своем составе систему поддержки принятия решений. Данная модель позволяет наглядно и обзорно определить функциональное назначение каждого этапа обработки информации и сформировать единый облик аппаратно-программного комплекса. При разработке модели приняты во внимание особенности измерения фотоплетизмограммы и требования к ее предобработке.

2. Разработаны методы и алгоритмы исследования зашумленных НВР сигнала ДФПГ. Алгоритмы позволяют минимизировать влияние внешних факторов, присущих неконтактным методам, сформировать оценки квазипериодической волны вне зависимости от воздействий окружающей среды. Представлена экспертная модель агрегирования ортогональных спектральных компонент НВР сигналов ДФПГ на основе анализа морфологии цветового пространства. Данная модель отличается простотой реализации при адекватности формируемых оценок квазипериодической волны.

3. Предложены этапы интеллектуального анализа экспериментальных данных ДФПГ, обеспечивающие системный подход к выделению и оценке основных характеристик квазипериодической волны. Разработаны алгоритмы, обеспечивающие адекватную оценку динамики мгновенной частоты представленной экспертной модели квазипериодической волны. Разработаны методы оценки динамики мгновенной частоты квазипериодической волны на основе скользящего анализа корреляционно – спектральных характеристик НВР, интеллектуального анализа квадратурных составляющих сигнала, а также на основе морфологических признаков квазипериодической волны и ее квадратуры, измеренной методом ДФПГ.

4. Разработанные теоретические положения и решения опробованы экспериментально. Произведена оценка метрик, характеризующих качество работы предлагаемых подходов. Предлагаемый в данной работе системный подход к исследованию характеристик квазипериодической волны, зарегистрированной методом ДФПГ, позволил увеличить параметр «точность», определяемый как доля значений в пределах заданного интервала к их общему числу, до значения 0,88 (максимум показателя равен 1,00). Данное значение превышает полученное в предыдущих исследованиях как минимум на 0,25. В отдельных случаях улучшение данного параметра достигает 0,47.

Таким образом, в диссертационной работе предложены методы, модели и алгоритмы обработки волновых процессов, в виде естественного симбиоза методов структурного и спектрального анализа динамики нестационарных временных рядов.

4. СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Лабунец Л.В., Ряхина М.Ю. Скользящий корреляционно-спектральный анализ сигналов неконтактной фотоплетизмографии для оценки частоты сердечных сокращений // Медицинская техника. 2023. № 4. С. 25-29. (0,38 п.л./0,2 п.л.).

2. Лабунец Л.В. Лукин Д.С. Ряхина М.Ю. Скользящий анализ аналитического сигнала неконтактной фотоплетизмографии для оценки частоты сердечных сокращений // Радиотехника и электроника. 2024. Т. 69, № 4. С. 385-393. (0,51 п.л./0,25 п.л.).

3. Лабунец Л.В., Ряхина М.Ю. Исследование показателей пульсовой волны на основе мгновенной частоты сигнала неконтактной фотоплетизмографии // Динамика сложных систем – XXI век. 2025. № 3. С. 74-81. (0,59 п.л./0,29 п.л.).

4. Лабунец Л.В., Ряхина М.Ю. Скользящий анализ длительности выбросов сигнала неконтактной фотоплетизмографии для оценки частоты сердечных сокращений // Радиотехника и электроника. 2025. Т. 70, № 7. С. 672-682. (0,57 п.л./0,28 п.л.).

5. Borzov A., Kasikin A., Labunets L., Ryakhina M. Heart rate intellectual analysis by structural decomposition methods of photoplethysmography signals (paper) [Электронный ресурс] // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems» (ITIDMS 2021): CEUR Workshop Proceedings. Russian Federation, Moscow: CEUR, 2021. Vol. 2843. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2843/#paper34> (дата обращения: 19.11.2025). (0,5 п.л./0,17 п.л.).

6. Labunets L.V., Ryakhina M.Yu. Algorithm of Sliding Correlation-Spectral Analysis for the Pulse Wave Instantaneous Frequency Estimation // 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). Moscow, Russian Federation: IEEE. 2024. P. 1-6. (0,6 п.л./0,35 п.л.).

7. Labunets L.V., Ryakhina M.Yu. Alternative Estimates of Heart Rate Based on Remote Photoplethysmography Signals Intellectual Analysis // 2024 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). Yekaterinburg, Russian Federation: IEEE. 2024. P. 59-62. (0,4 п.л./0,25 п.л.).

8. Labunets L.V., Ryakhina M.Yu. Heart Rate Estimation Based on Remote Photoplethysmography Signal Hilbert Transform // 2024 26th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA). Moscow, Russian Federation: IEEE. 2024. P. 1-5. (0,5 п.л./0,3 п.л.).

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2023666600. Программа для определения частоты сердечных сокращений методом скользящего корреляционно-спектрального анализа сигналов неконтактной фотоплетизмографии: заявл. 19.07.2023; опубл. 02.08.2023 / Л.В. Лабунец, М.Ю. Ряхина; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана».

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2023683907. Программа для оценки частоты сердечных сокращений на основе преобразования Гильберта сигнала неконтактной фотоплетизмографии: заявл. 24.10.2023; опубл. 10.11.2023 / Л.В. Лабунец, М.Ю. Ряхина; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана».

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2024610906. Программа анализа длительности выбросов сигнала неконтактной фотоплетизмографии для оценки частоты сердечных сокращений: заявл. 28.12.2023: опубл. 16.01.2024 / Л.В. Лабунец, М.Ю. Ряхина; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана».