

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, профессора,
профессора Высшей школы технологий искусственного интеллекта федерального
государственного автономного образовательного учреждения высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Большакова Александра Афанасьевича

на диссертационную работу Копелиовича Михаила Викторовича
«Эффективная системная интеграция методических и алгоритмических
средств дистанционной фотоплетизмографии»

представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук
по специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика»

1. Актуальность исследования

В функционирующих системах управления с оператором для стабильной работы необходимо осуществлять мониторинг его состояния. Наиболее популярным способом оценки психофизического состояния оператора является анализ динамики частоты сердечных сокращений.

Обычно применяются комплексы регистрации частоты сердечных сокращений, которые включают контактные датчики и имеют определенные ограничения по вариантам использования и длительности мониторинга. Поэтому метод дистанционной фотоплетизмографии, который осуществляет оценку частоты сердечных сокращений по видеоизображению кожных покровов на основе доступных видеокамер и вычислительных устройств, является достаточно перспективным.

Разработке системы дистанционной фотоплетизмографии, реализующей современные методические и алгоритмические средства для повышения точности измерений в условиях помех при мониторинге состояния человека-оператора, посвящена диссертация Копелиовича Михаила Викторовича.

Объектом исследования автора является процесс дистанционной фотоплетизмографии для бесконтактного оценивания частоты сердечных сокращений по видеоизображению.

Предметом исследования являются методические и алгоритмические средства, реализуемые в системе дистанционной фотоплетизмографии, направленные на повышение точности оценивания частоты сердечных сокращений в условиях наличия низкочастотных и высокочастотных помех в видеоизображении.

Ключевой задачей работы является совершенствование метода оценивания частоты сердечных сокращений по видеоизображению в условиях реального практического применения на основе общедоступных компьютеров и видеокамер.

Исследования, проведенные в работе, использованы при выполнении НИР «Исследования по разработке интегрированной системы оценки лётной ситуации и обеспечения безопасности полёта с использованием системы мониторинга психофизического состояния и действий экипажа на основе биометрических измерений, пара- и экстралингвистических характеристик речевых обменов, комплексных физиологических показателей. Разработка комплексных критериев оценки и прогноза функционального состояния пилотов и лиц диспетчерского

состава» по договору № 7192 от 01.04.2013 между ЦАГИ и НИИНК им. А.Б. Когана ЮФУ. Разработанный алгоритм и программное обеспечение апробированы в практической деятельности автора и внедрены в информационно-технологической компании ООО «Вижнтех».

Исходя из вышеуказанного, следует, что диссертация Копелиовича Михаила Викторовича, посвященная повышению эффективности бесконтактного оценивания частоты сердечных сокращений по видеоизображению на основе разработки системы дистанционной фотоплетизмографии, реализующей методические и алгоритмические средства для увеличения точности в условиях помех при мониторинге состояния человека-оператора, является актуальной.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций является достаточно высокой и подтверждается корректным применением системного подхода, методов обработки изображений, теории информатики, математической статистики, искусственного интеллекта.

Сформулированные научные положения подтверждаются также положительными результатами практического использования разработанных автором программных средств, реализующих предложенные методы и алгоритмы, на предприятиях:

- ООО «Вижнтех»: внедрение при разработке программы непрерывного мониторинга состояния человека-оператора с использованием веб-камеры и стационарного компьютера; повышена точность оценивания частоты сердечных сокращений, сокращены затраты на вычислительные ресурсы;

- НИИ НК ЮФУ: разработка методов анализа видеоизображений для дистантной пульсометрии при выполнении НИР «Исследования по разработке интегрированной системы оценки летной ситуации и обеспечения безопасности полета с использованием системы мониторинга психофизического состояния и действий экипажа на основе биометрических измерений, пара- и экстралингвистических характеристик речевых обменов, комплексных физиологических показателей. Разработка комплексных критериев оценки и прогноза функционального состояния пилотов и лиц диспетчерского состава», осуществленная в рамках договора № 7192 от 01.04.2013 между ЦАГИ и НИИНК им. А.Б. Когана ЮФУ.

Полученные научные результаты и практические достижения с использованием методов и алгоритмов дистанционной фотоплетизмографии рекомендуется применять в различных отраслях промышленности в виде проблемно-ориентированных систем поддержки принятия решений (СППР). Полученные научно-технические решения по построению программных средств целесообразно использовать при обучении студентов технических университетов.

3. Достоверность и новизна научных положений и рекомендаций

Достоверность научных положений и рекомендаций подтверждается соответствием теоретических положений полученным результатам и практикой их успешного использования предприятиями, использующими человека-оператора в собственной деятельности, а также образовательными учреждениями. Это под-

тверждает, что разработанные автором методы и алгоритмы позволяют успешно решать задачи, связанные с мониторингом состояния человека-оператора для повышения эффективности функционирования различных эргатических систем управления, следовательно, адекватны.

Новизна научных положений, значимость для науки и практики результатов диссертационного исследования заключается в следующем:

- критерий эффективности интеграции компонентов в систему для обеспечения баланса между точностью и вычислительными затратами;
- методы:
 - модифицированный для дистанционной фотоплетизмографии;
 - выбора наиболее информативных областей на видеоизображении лица;
- алгоритм адаптивного преобразования фотоплетизмографического сигнала.

Полученные вышеописанные результаты позволили разработать систему дистанционной фотоплетизмографии, которая реализует современные методические и алгоритмические средства для повышения точности измерений в условиях помех при мониторинге состояния человека-оператора.

4. Значимость для науки и практики выводов и рекомендаций диссертации

Значимость для науки выводов и рекомендаций диссертационного исследования представляют предложенный критерий эффективности интеграции компонентов в систему; методы для дистанционной фотоплетизмографии, выбора наиболее информативных областей на видеоизображении лица; а также алгоритм адаптивного преобразования фотоплетизмографического сигнала для реализации решения задачи создания системы дистанционной фотоплетизмографии. При этом доказано повышение точности измерений в условиях помех при мониторинге состояния человека-оператора.

Значимость для практики выводов и рекомендаций диссертационного исследования заключается в том, что предложенные алгоритмы обеспечивают более высокую точность по сравнению с аналогами. При этом более низкие требования к аппаратному обеспечению позволяют интегрировать систему в устройства с ограниченными ресурсами для длительного бесконтактного мониторинга. Разработанную систему целесообразно использовать для мониторинга состояния оператора, в т.ч. офисных работников, водителей и представителей других профессий, которые подвергаются риску из-за монотонной деятельности, стрессовых ситуаций.

Основные результаты и выводы диссертационного исследования автора представлены в 28 статьях, в т.ч. в 2-х опубликованных в рецензируемых научных журналах и изданиях из Перечня, рекомендованного ВАК (К1); в 4-х – в Web of Science, в т.ч. 1 – в PubMed (Q1), а также 5 – в Scopus. Прошли апробацию на различных научных международных и российских конференциях. По результатам диссертационного исследования получено 9 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ РФ.

5. Заключение

5.1 Оценка диссертационного исследования как квалификационной работы

Диссертационная работа Копелиовича Михаила Викторовича является завершенной самостоятельно выполненной научно-квалификационной работой, в которой на основе авторских исследований разработаны новые метод и алгоритмы дистанционной фотоплетизмографии, практическое использование которых позволяет существенно повысить точность измерений в условиях помех при мониторинге состояния человека-оператора, т.е. решена научная задача, имеющая важное хозяйственное значение. На основании вышеуказанного можно утверждать, что работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук и изложенным в Постановлении Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842 «О порядке присуждения учёных степеней» (с изменениями и дополнениями) в редакции от 16 октября 2024 г. (пункты 9, 10, 11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней»).

5.2 Оценка содержания и авторского вклада. Соответствие работы паспорту специальности

Диссертация соответствует следующим пунктам области исследования специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»:

ПЗ: *«Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта».* Разработана функциональная модель процесса дистанционной фотоплетизмографии, отличающаяся интеграцией методических и алгоритмических средств в единую систему, что позволило повысить эффективность оценивания частоты сердечных сокращений (п. 2.1–2.3 диссертации).

П4: *«Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта».* Разработан модифицированный метод дистанционной фотоплетизмографии, отличающийся компонентом выбора наиболее информативных областей лица и интеграцией компонента преобразования фотоплетизмографического сигнала, что позволило обеспечить баланс между точностью и вычислительными затратами (п. 2.4); разработана методика выбора наиболее информативных областей на видеоизображении лица, отличающаяся от известной применением спектральной энтропии Шеннона вместо отношения «сигнал/шум», что позволило повысить точность измерений (п. 3); разработан алгоритм адаптивного преобразования фотоплетизмографического сигнала, отличающийся от ранее разработанных применением аппроксимации первой конечной разности сигнала с использованием однослойной нейронной сети с радиально-базисными функциями, что позволило повысить точность измерений (п. 4).

Таким образом, предложены критерий эффективности интеграции компонентов в систему для обеспечения баланса между точностью и вычислительными затратами, модифицированный метод дистанционной фотоплетизмографии, методика выбора наиболее информативных областей на видеоизображении лица, алгоритм адаптивного преобразования фотоплетизмографического сигнала, с использованием которых построены системы дистанционной фотоплетизмографии, обеспечивающие повышение точности измерений в условиях помех при мониторинге состояния человека-оператора.

Общая характеристика работы

Диссертация включает введение, 5 глав, заключение, список сокращений и обозначений, список использованных источников из 241 наименования, 4 приложения. Полный объём диссертации составляет 197 страниц.

Во *введении* обоснована актуальность выполненных автором научных исследований. Сформулированы цель и задачи диссертационной работы. Приведены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, информационная база и методы исследования, обоснованность и достоверность полученных в работе результатов. Приведены результаты практической реализации работы. Представленное соискателем обоснование актуальности темы и цели диссертационного исследования выполнено корректно и замечаний не вызывает.

В *первом разделе* осуществлен анализ методов, алгоритмов и автоматизированных систем оценивания и мониторинга частоты сердечных сокращений (ЧСС). Выполнена классификация методов, анализ их достоинств и недостатков. Показаны принципиальные преимущества систем дистанционной фотоплетизмографии (ДФПГ) по сравнению с другими системами оценивания ЧСС. Приведены и проанализированы важные факторы, которые влияют на качество оценивания ЧСС по видеоизображению лица системами ДФПГ. Определены контролируемые условия эксплуатации системы ДФПГ и условия практического применения. Показано, что несмотря на активное развитие направления дистанционной фотоплетизмографии, разработка прикладных решений регистрации частоты сердечных сокращений требует дальнейших исследований. На основе проведённого анализа сделан вывод о необходимости разработки систем ДФПГ, обеспечивающих повышенную точность оценки ЧСС при наличии движений человека на видеоизображении, а также позволяющих проводить непрерывный мониторинг при использовании общераспространённых вычислительных устройств. Обоснована актуальность задачи выбора наиболее информативных областей на видеоизображении лица для последующего выделения и обработки фотоплетизмографического сигнала.

Во *втором разделе* построена функциональная модель процесса ДФПГ для оценивания ЧСС по видеоизображению в режиме реального времени при обработке кадров видеокамеры. Предложен и обоснован критерий эффективности интеграции методических и алгоритмических средств в единую систему ДФПГ. Соответствующий критерию показатель качества интегрирует снижение относительной погрешности оценивания ЧСС и повышение роста вычислительных за-

трат. Это позволило обеспечить баланс между точностью измерений и вычислительными затратами. Разработан модифицированный метод, отличающийся модификацией компонента выбора наиболее информативных областей лица и интеграцией компонента преобразования фотоплетизмографического сигнала. Сформулирована задача диссертационного исследования по повышению эффективности бесконтактного оценивания ЧСС по видеоизображению согласно предложенному критерию на основе разработки системы ДФПГ, интегрирующей методические и алгоритмические средства и обеспечивающей повышенную точность в условиях помех при практическом применении в рамках мониторинга состояния человека-оператора.

В *третьем разделе* описаны результаты анализа существующей методики выбора наиболее информативных областей лица, основанной на соотношении «сигнал/шум». Выявлены её принципиальные ограничения в условиях практического применения в системе ДФПГ для оценивания ЧСС человека-оператора. Разработана новая методика выбора наиболее информативных участков лица с использованием спектральной энтропии Шеннона, которая позволяет решать задачу оптимизации выбора области анализа без зависимости от отношения «сигнал/шум». Обосновано преимущество предложенной методики в условиях реального применения, когда спектральные характеристики помех совпадают или располагаются в близком диапазоне с частотами сердечных сокращений.

В *четвертом разделе* разработан алгоритм адаптивного преобразования фотоплетизмографического сигнала для оценивания ЧСС, который отличается применением аппроксимации первой конечной разности сигнала с использованием однослойной нейронной сети с радиально-базисными функциями. Это позволило преодолеть ограничения алгоритмов полосовой фильтрации ФПГ-сигнала из-за использования фиксированного диапазона частот, последующей утрате потенциально значимых спектральных компонентов, находящихся за его пределами. При этом аппроксимации подвергается не исходный ФПГ-сигнал, а его первая конечная разность. Это позволило повысить чувствительность к релевантным высокочастотным компонентам сигнала, связанным с ЧСС, и одновременно снизить влияние низкочастотных помех, вызванных движениями в кадре и вариабельностью освещения. Предложенная архитектура нейронной сети с одним скрытым слоем, содержащим РБФ-ноды, адаптирует параметры к сигналу на основе оптимизационного критерия минимизации среднеквадратической ошибки. Разработанный алгоритм характеризуется низкой вычислительной сложностью, линейно зависящей от количества кадров в видеоряде и др. Поэтому его целесообразно использовать в системах реального времени и на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами.

В *пятом разделе* представлены результаты экспериментальных исследований разработанных средств и систем ДФПГ для анализа точностных характеристик, вычислительной нагрузки и оценки эффективности интеграции компонентов в единую систему ДФПГ. Показано, что предложенная методика выбора наиболее информативных областей лица на основе спектральной энтропии позволяет повысить точность измерения оценки ЧСС по сравнению с традиционны-

ми методиками. Экспериментальное исследование алгоритма адаптивного преобразования ФПГ-сигнала, основанного на аппроксимации конечной разности сигнала однослойной нейронной сетью с радиальными базисными функциями, показало повышение точности оценивания ЧСС. Разработанная система ДФПГ с интегрированными компонентами выбора области для анализа и преобразования ФПГ-сигнала позволяет снизить среднюю относительную погрешность оценки ЧСС на 80 %. Анализ вычислительной нагрузки системы показал, что разработанная система ДФПГ способна работать в реальном времени на современном оборудовании. Обобщённый показатель качества, отражающий прирост точности и вычислительной нагрузки, достигает максимального значения 8,18 при интеграции компонента преобразования сигнала. Таким образом, предложенные модификации обеспечивают значительное повышение точности при умеренном росте вычислительных затрат.

В заключении обобщены полученные в процессе диссертационного исследования научные и практические результаты.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Оформление диссертации и автореферата соответствует Национальному стандарту РФ ГОСТ Р 7.0.11-2011 «Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления». М.: Стандартинформ, 2018, а также Приказу Минобрнауки России от 7 июня 2021 г. № 458 «О внесении изменений в Положение о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени кандидата наук, утвержденное приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 10 ноября 2017 г. № 1093». В целом представленные материалы диссертационной работы позволяют достаточно полно оценить объём, сложность и актуальность проведённого исследования.

Общие замечания по диссертационной работе

1. Имеет смысл разработку модифицированного метода дистанционной фотоплетизмографии сформулировать в виде отдельной задачи, решение которой позволило получить новый научный результат.

2. Аналогично, предложенный критерий эффективности интеграции компонентов в систему для обеспечения баланса между точностью и вычислительными затратами также представляет научную новизну согласно п. 3 паспорта научной специальности 2.3.1.

3. На этапе системного анализа рекомендуется разработка семантической модели в виде онтологической схемы исследуемой предметной области, связанной с построением систем дистанционной фотоплетизмографии, что повышает эффективность их проектирования и реализации.

4. Не представлено полное описание специального математического обеспечения (п.п. 5), разработка которого подтверждена государственной регистрацией программ для ЭВМ Российской Федерации: архитектура, позволяющая выполнять требуемые функции, инфологическая модель, UML-диаграммы интерфейсов и др.

5. Пункт 2.5 «Постановка задачи диссертационного исследования»

целесообразно перенести в завершении раздела 1. В разделе 2 сформулировать уточняющие формулировки в постановке задачи.

6. Замечания по оформлению диссертации и автореферата.

Обычно полученный новый научный результат относят к одному из пунктов паспорта научной специальности. В соответствии с этим рекомендуется следующее соотнесение полученных научных результатов пунктам паспорта научной специальности 2.3.1:

- 2. *Разработан модифицированный **метод** дистанционной фотоплетизмографии...* (п.п. 4 «Разработка **методов** и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта»);

- 3. *Разработана **методика** выбора наиболее информативных областей на видеоизображении лица...* (п.п. 4 «Разработка **методов** и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта»);

- 4. *Разработан **алгоритм** адаптивного преобразования фотоплетизмографического сигнала* (п.п. 4 «Разработка **методов** и **алгоритмов** решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта»).

При этом полученные 4 новых научных результата соответствуют в порядке их указания 4-м аспектам паспорта научной специальности 2.3.1:

- системный анализ (функциональная модель процесса дистанционной фотоплетизмографии);

- управление (модифицированный метод дистанционной фотоплетизмографии);

- обработка информации (методика выбора наиболее информативных областей на видеоизображении лица);

- статистика (алгоритм адаптивного преобразования фотоплетизмографического сигнала).

Отмеченные замечания и рекомендации не влияют на главные теоретические и практические результаты диссертации.

5.3 Опубликование основных результатов

По теме диссертации опубликовано 28 печатных работ, в том числе 2 статьи в журналах из Перечня, рекомендованного ВАК (K1); 4 статьи – в журналах, индексируемых в Web of Science (1 – в PubMed (Q1)) и 5 – в Scopus; 9 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, 8 – публикаций в других изданиях.

5.4 Характеристика источников результатов работы

В диссертационной работе и автореферате содержатся необходимые обязательные ссылки на источник заимствования.

Таким образом, работа в целом соответствует пункту 14 «Положения о присуждении ученых степеней».

ОБЩИЙ ВЫВОД

Считаю, что диссертация Копелиовича Михаила Викторовича «Эффективная системная интеграция методических и алгоритмических средств дистанционной фотоплетизмографии», представленная на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика», отвечает формуле и пунктам области исследования специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук и изложенным в Постановлении Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842 «О порядке присуждения учёных степеней» (с изменениями и дополнениями) в редакции от 16 октября 2024 г. (пункты 9, 10, 11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней»), а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

Оппонент согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и дальнейшую их обработку.

Официальный оппонент,
доктор технических наук, профессор,
профессор Высшей школы технологий искусственного интеллекта
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого»

Большаков Александр Афанасьевич
08 октября 2025 года

Специальности, по которым защищена докторская диссертация:

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в промышленности);

05.13.10 – Управление в социальных и экономических системах.

Адрес места работы: Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, корп. 4, ауд. 306

Тел. каф.: +7 (812) 552-65-21, моб.: +7 (931) 541-41-59; e-mail: aabolshakov57@gmail.com

Подпись официального оппонента А.А. Большакова заверяю

