

На правах рукописи

НГУЕН ДАНГ КУАНГ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО
КОМПЛЕКСА ДЛЯ АНАЛИЗА ПСИХОЭМОЦИОНАЛЬНОГО
СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА**

**специальность: 05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского
назначения**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Томск - 2018

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ).

Научный руководитель:

Авдеева Диана Константиновна,

доктор технических наук, доцент.

Официальные оппоненты:

Новиков Алексей Алексеевич,

доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Омский государственный
технический университет», профессор
кафедры «Машиностроение и
материаловедение»

Чухланцева Марина Михайловна,

кандидат технических наук, доцент,
директор ФБУ «Государственный
региональный центр стандартизации,
метрологии и испытаний в Томской
области»

Ведущая организация:

Открытое акционерное общество научно-
производственное объединение «Экран»
(г. Москва)

Защита состоится «11» декабря 2018 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: Россия, 634028, г. Томск, ул. Савиных, д.7, ауд.215.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 53, и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>.

Автореферат разослан «__» октября 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, доцент, к.т.н.

Шевелева Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Эмоции являются неотъемлемой частью существования человека, сопровождающей его на протяжении всей жизни и участвующей во всех сферах его деятельности. При восприятии окружающей информации сенсорная сущность определяемых понятий объектов проходит обработку мозгом и находит свое отражение в эмоциональной реакции человека. Таким образом, эмоции имеют когнитивную природу и взаимодействуют с математическими, перцептивными и вербальными функциями человека, что включает ее в любую мыслительную деятельность, в том числе: исполнение профессиональных обязанностей, формирование отношения к концепциям объектов восприятия, принятие любых решений, регуляция поведения, определение собственно социальной роли и др.

Переживаемые человеком эмоции закрепляют отношение человека к пережитому опыту и формируют в нем определенные страхи, комплексы, которые в дальнейшем оказывают влияние на его поведение. Под влиянием данных комплексов и страхов человек склонен принимать заведомо ошибочные решения, мешать собственной реализации как личности.

Например, избегать любой конфронтации с другими людьми из-за неуверенности в себе, сформированной эмоционально негативно окрашенным опытом в прошлом. Такое поведение не только может негативно сказаться на психологическом здоровье человека, но так же повлиять на деятельность окружающих, например, приводя к саботажу работы бригады работников, снижению эффективности самого человека или возникновению производственной ошибки на рабочем месте. Кроме этого, возникшие комплексы могут стать причиной самоисключения человека из социума, развитию девиантного поведения, которое в некоторых случаях может быть опасно для человека и его окружения.

Другим негативным аспектом воздействия эмоций и неразрешенного негативного опыта является соматизация внутренних переживаний и появление у человека соматоформных заболеваний, представляющих серьезную угрозу здоровью человека.

С развитием общества и переходом его на новые уровни развития роль негативного информационного влияния эмоций на жизнь человека продолжает расти. В современном мире человеку приходится сталкиваться с огромным количеством информации, соблюдать быстрый темп работы и постоянно выдерживать социальное давление со стороны окружающих. В процессе работы, при социальном взаимодействии, принятии решений, выполнении сложных физических действий и когнитивной работе человек испытывает различные формы эмоционального стресса.

Стресс как массовое явление ментального состояния широко распространен в различных странах. Ему подвержена значительная часть населения в различных странах. Так, например, по одному из исследований в

США данная часть населения составляет 40%, в Японии – 60%, Австралии – 35%, а во Франции 40%. Стресс при коротком воздействии не оказывает значительного губительного влияния на здоровье человека, но его длительное воздействие, в итоге может привести к негативным последствиям. Такими последствиями могут стать нарушение работы различных систем организма, таких как: нервная, сердечно-сосудистая, пищеварительная, мочеполовая системы и др. Все воздействие на организм носит накапливающийся характер и незаметно для человека на ранних этапах длительного стресса, особенно при быстром темпе жизни. Человек может длительное время не уделять внимание этой проблеме, что приведет, в конечном итоге, к ухудшению качества его жизни и здоровья. В год по статистике на ликвидацию последствий стресса в США расходуется 190 миллиардов долларов, а в странах Евросоюза – 20 миллиардов евро.

Часто воздействие стресса и внутренние нерешенные проблемы вызывают у человека такие распространенные заболевания как депрессия или состояние тревожности. По статистике ВОЗ от депрессии страдает минимум 300 миллионов человек всех возрастов, так же утверждается, что она является второй по распространенности причиной самоубийства у людей младше 30 лет.

Описанные выше явления негативного влияния эмоций подтверждают необходимость принятия мер для оценки психоэмоционального состояния человека (ПЭС). При этом, ввиду вовлеченности эмоций во все сферы деятельности человека, необходимо проводить оценку ПЭС не только посредством единичных визитов в медицинское учреждение для выявления скрытых причин страхов и беспокойств, фиксаций на идее, но и периодическое наблюдение во всех учреждениях, где важно следить за состоянием человека. Например, проверять человека на подходящий уровень устойчивости при приеме на работу, чтобы определить будет ли он в состоянии выполнять возложенные на него обязанности без вреда для себя и окружающих. Это позволит вести мониторинг ПЭС человека и вовремя оказывать необходимую помощь нуждающимся людям, а так же выявлять опасное для себя и окружающих поведение, тем самым сократив количество непреднамеренных убийств, самоубийств, случаев соматоформных и других заболеваний и повысить качество жизни человека в общем.

Цель диссертационной работы

Разработка и исследование аппаратно-программного комплекса для анализа психоэмоционального состояния человека.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать аппаратно-программный комплекс высокого разрешения на наносенсорах для одновременной регистрации электрокардиограммы, электроэнцефалограммы и потенциала кожно-гальванической реакции в реальном времени без усреднения и фильтрации в расширенном диапазоне частот от 0 до 10000 Гц, уровнем от 1 мкВ, с

частотой дискретизации сигналов 64 кГц.

2. Разработать специальное устройство с встроенными наносенсорами для наложения ладони с целью съёма электрокардиограммы и потенциала кожно-гальванической реакции, обеспечивающее высокую пропускную способность при массовых обследованиях ПЭС.

3. Разработать программу в программном пакете Matlab для классификации вопросов на 2 группы по параметрам зарегистрированных наносенсорами сигналов в полосе от 0 до 10000 Гц, основанную на методе линейного дискриминантного анализа (ЛДА).

4. Разработать алгоритм и программу для детектирования и подсчёта количества импульсов на зарегистрированных сигналах КГР, ЭКГ и ЭЭГ с заданным шагом.

5. Разработать программу и методики исследований ПЭС на добровольцах.

6. Провести исследования психоэмоционального состояния на добровольцах.

7. С помощью (ЛДА) определить значимость каждого параметра для деления вопросов на два класса. Провести оптимизацию количества параметров и вопросов для устойчивого деления вопросов на спокойные и волнующие.

Объект исследования – психоэмоциональное состояние человека.

Предмет исследования – аппаратно-программный комплекс высокого разрешения на наносенсорах, параметры широкополосных биопотенциалов – ЭКГ, КГР и ЭЭГ при исследовании ПЭС и определение их значимости методом линейного дискриминантного анализа (ЛДА), анализ результатов исследования ПЭС на группе добровольцев.

Методы исследований

Теоретические и экспериментальные, основанные на теории измерительных сигналов, прикладной и вычислительной математике, прикладных программах для персонального компьютера, принципах построения современных аппаратно-программных средств.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждаются использованием аттестованного испытательного стенда, прошедшего испытания в Томском центре стандартизации и метрологии, результатами предварительных исследований ПЭС на добровольцах, достаточным объёмом проведенных исследований на добровольцах, сопоставлением полученных результатов с известными, полученными на стандартном оборудовании.

Научная новизна работы:

1) Впервые зарегистрированы на разработанном аппаратно-программном комплексе на наносенсорах при психоэмоциональном исследовании группы добровольцев электрокардиограмма (ЭКГ), электроэнцефалограмма (ЭЭГ) и кожно-гальваническая реакция (КГР) в широком частотном диапазоне от 0 до 10000 Гц уровнем от 1 мкВ с частотой

дискретизации сигнала 64 кГц в реальном времени без фильтрации в измерительном канале и последующего усреднения при обработке сигналов.

2) Впервые для оценки ПЭС в частотной полосе (0-10000) Гц зарегистрированы изменения амплитуды и количества микропотенциалов на кардиоцикле, изменения формы и амплитуды Р-зубца ЭКГ, скачкообразные изменения ЭЭГ, высокий уровень импульсной активности ЭЭГ, импульсная активность малой длительности на КГР в ответ на стрессирующее воздействие.

3) Впервые доказана с помощью метода дискриминантного анализа (ЛДА) наибольшая значимость для оценки ПЭС человека при исследовании ЭКГ, КГР и ЭЭГ аппаратно-программным комплексом высокого разрешения на наносенсорах в диапазоне частот от 0 до 10000 Гц следующих параметров: длительность импульсов ЭЭГ, размах импульсов ЭЭГ, время реакции КГР, время до реакции импульсов ЭЭГ, размах скачка на ЭЭГ, изменение КГР-deltaU – КГР, количество импульсов на КГР, изменение ЧСС.

Практическая ценность работы:

1) Диссертационная работа выполнялась в соответствии с планами работ Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности ФГАОУ ВО НИ ТПУ, по проекту ФЦП «Разработка экспериментального образца аппаратно-программного комплекса для неинвазивной регистрации микропотенциалов сердца в широкой полосе частот без фильтрации и усреднения в реальном времени с целью раннего выявления признаков внезапной сердечной смерти», Соглашение № 14.578.21.0032 от 05.06.2014, 2014-2016 гг.

2) Разработано устройство с встроенными наносенсорами для съёма электрокардиограммы и кожно-гальванической реакции, обеспечивающее высокую пропускную способность при массовых исследованиях ПЭС (в школах, автошколах, поликлиниках, службах безопасности различных учреждений).

3) Проведены исследования ПЭС у добровольцев в Томском НИИ кардиологии. Получен акт внедрения.

Личный вклад автора

Основные научные теоретические и экспериментальные исследования выполнены автором самостоятельно либо при его непосредственном участии.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1) Аппаратно-программный комплекс высокого разрешения для одновременной регистрации электрокардиограммы, электроэнцефалограммы и кожно-гальванической реакции при психоэмоциональном исследовании человека в реальном времени без усреднения и фильтрации в широком диапазоне частот от 0 до 10000 Гц, уровень которых составляет единицы и десятки микровольт.

2) Комплекс новых параметров зарегистрированных в широкой полосе частот ЭКГ, ЭЭГ, КГР для оценки ПЭС – изменения амплитуды и количества микропотенциалов на кардиоцикле, изменения формы и амплитуды Р-зубца

ЭКГ, скачкообразные изменения ЭЭГ, высокий уровень импульсной активности ЭЭГ, импульсная активность малой длительности на КГР в ответ на стрессирующее воздействие.

3) Наиболее значимыми для оценки ПЭС являются следующие параметры – длительность импульсов ЭЭГ, размах импульсов ЭЭГ, время реакции КГР, время до реакции импульсов ЭЭГ, размах скачка на ЭЭГ, изменение КГР-deltaU – КГР-1, количество импульсов на КГР, изменение ЧСС.

Апробация работы

Основные результаты проведенных исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- II Международная научная конференция: «Иностранный язык в контексте проблем профессиональной коммуникации». – Томск, 27-29 апреля 2015 г.

- V Всероссийская научно-практическая конференция «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность». – Томск, 25-29 Мая 2015.

- VI Научно-практическая конференция с международным участием «Информационно-измерительная техника и технологии». – Томск, 27-30 мая 2015 г.

- III Международная научная конференция «Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине». – Томск, 23-26 мая 2016 г.

- VIII Международная научно-практическая конференция «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине». – Томск, 1-3 июня 2016 г.

- XXIII Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых «ВНКСФ-23». – Екатеринбург, 1-5апреля 2017 г.

- IV Международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле SIBTEST 2017. – Новосибирск, 26-30 июня 2017 г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе: 1 – в изданиях из списка ВАК, 3 – в зарубежных изданиях, рецензируемых базой цитирования SCOPUS. Получено 1 свидетельство на программу ЭВМ. Результаты исследований изложены в четырех отчетах о ПНИ, зарегистрированных в ЦИТИС.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и 7 приложений. Общий объем 306 страниц, в т.ч. рисунков – 99, таблиц – 73, библиография содержит 155 наименований. Общий объем приложений составляет 175 страниц.

В первой главе диссертации сделан аналитический обзор методов и технических средств для оценки психоэмоционального состояния человека.

Дано определение ПЭС и его влияние на здоровье человека. С

развитием общества и переходом его на новые уровни развития роль негативного информационного влияния эмоций на жизнь человека продолжает расти. В современном мире человеку приходится сталкиваться с огромным количеством информации, соблюдать быстрый темп работы и постоянно выдерживать социальное давление со стороны окружающих. В процессе работы, при социальном взаимодействии, принятии решений, выполнении сложных физических действий и когнитивной работе человек испытывает различные формы эмоционального стресса.

Человек может длительное время не уделять внимание этой проблеме, что приведет, в конечном итоге, к ухудшению качества его жизни и здоровья. Сделано обоснование необходимости разработки аппаратуры высокого разрешения для оценки ПЭС, обеспечивающей высокую пропускную способность диагностического кабинета.

На основании проведенного анализа сделаны следующие выводы:

1 В современном мире стрессы вызывают у человека такие распространенные заболевания как депрессия или состояние тревожности.

2 Необходимо проводить оценку ПЭС не только посредством единичных визитов в медицинское учреждение для выявления скрытых причин страхов и беспокойств, фиксаций на идее, но и периодическое наблюдение во всех учреждениях, где важно следить за состоянием человека.

3 Для исследования ПЭС применяются как субъективные, так и объективные методы исследований.

4 Эффективными способами для исследования уровня психоэмоционального стресса человека являются методы, в которых широко применяются электрофизиологические параметры человека, основанные на регистрации электрокардиограммы, электроэнцефалограммы, электромиограммы, электроокулограммы и кожно-гальванической реакции.

5 Для развития методов оценки психоэмоционального состояния человека в настоящее время наблюдается тенденция создания новых методов и технических средств, работающих в расширенном диапазоне частот.

6 Существующая аппаратура для оценки ПЭС функционирует в стандартных частотных диапазонах, имеет низкую разрешающую способность, содержит фильтры, ограничивающие сигналы как в области нижних, так и верхних частот.

7 Разработка технических средств и методов оценки ПЭС, регистрирующих сигналы в диапазоне от 0 до 10000 Гц без фильтрации и усреднения позволит получить новую информацию об уровнях сигналов и времени реакции на стрессирующее воздействие, неискаженное фильтрами.

Во второй главе дано обоснование технических требований к измерительным схемам, представлено описание функциональной и принципиальной схем АПК, технические характеристики АПК, требования к программному обеспечению, дано описание устройства для наложения левой и правой руки исследуемого для регистрации КГР и ЭКГ.

Аппаратно-программный комплекс представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Аппаратно-программный комплекс для исследования ПЭС

В состав АПК входят:

- инструкция по эксплуатации;
- заглушка для разъема АПК;
- набор наносенсоров;
- кабель сопряжения наносенсоров и измерительного блока;
- персональный компьютер (ПК);
- кабель связи измерительного блока с ПК;
- измерительный блок,
- 2 устройства с встроенными наносенсорами для наложения левой и правой руки, рисунок 2.

Уровень шумов наносенсоров по мгновенному значению (± 200 нВ) в частотном диапазоне от 0 до 10 кГц. Технические характеристики разработанного для исследования ПЭС АПК представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики АПК

Параметр	Значение
Ток, потребляемый АПК в режиме записи	Не более 300 мА
Диапазон входных напряжений при регистрации сигнала	от $\pm 1,0$ мкВ до ± 10 мВ
Частотный диапазон	от 0 до 10000 Гц
Частота дискретизации	64000 Гц
Входной импеданс	Не менее 10 Мом
Неравномерность АЧХ в диапазоне от 0 до 10000 Гц	от ± 20 % до ± 10 %
Постоянный ток в цепи пациента	не более 0,1 мкА
Диапазон измеряемых длительностей микропотенциалов	от 0,2 мс до 100 мс

Технические характеристики АПК на наносенсорах для исследования ПЭС человека определены по результатам испытаний АПК на специальном оборудовании, аттестованном ФБУ «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Томской области».

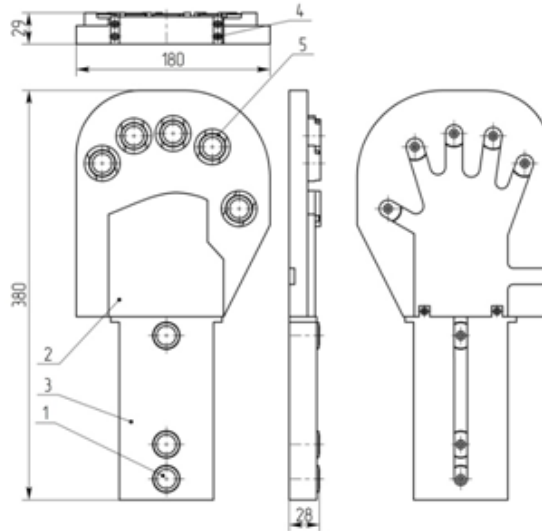


Рисунок 2 – Сборочный чертёж устройства для съёма ЭКГ и КГР с левой руки: 1 – наносенсор, 2 – опора, 3 – основание, 4 – винт, 5 – уплотнительное кольцо

Требования к программному обеспечению:

- Программное обеспечение должно обеспечить измерение амплитуды зарегистрированных сигналов (от 1 мкВ), их длительности, времени реакции и задержки реакции на задаваемый вопрос (от 0,2 мс), измерение частоты сердечных сокращений.

- В программном обеспечении должно быть предусмотрено устранение сосредоточенных помех и собственного шума АПК.

- Должно быть разработано программное обеспечение для классификации ответов на вопросы на две группы: волнующие (стрессорирующие) и спокойные (нейтральные).

- Должна быть разработана программа для определения количества импульсов на ЭЭГ, КГР и микропотенциалов на ЭКГ.

В третьей главе дается описание метода обработки электрофизиологических сигналов для оценки ПЭС человека, зарегистрированных наносенсорами.

Для принятия решений по оценке психоэмоционального состояния человека необходимо учитывать большое количество переменных, измеряемых в ходе исследования. Для решения подобных задач используют методы многомерного статистического анализа. Целью эксперимента является классификация вопросов на нейтральные вопросы и вопросы, вызывающие заметное отклонение от обычного состояния (стресс) у исследуемого. При этом регистрируются биомедицинские сигналы (реакции) при ответах на нейтральные и стрессорирующие вопросы, которые заранее заготовлены. Имеется также набор контрольных вопросов. Это типичная

задача распознавания для двух классов с обучением. Для данной задачи наиболее подходит метод линейного дискриминантного анализа Фишера. Данный классический метод широко используется в биомедицинских исследованиях, в частности, в задачах диагностики заболеваний.

Линейный дискриминантный анализ требует выполнения ряда предположений. Вектор наблюдений $\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_p)^T$ должен относиться к одному из двух классов, имеющих многомерные нормальные распределения с различными математическими ожиданиями и одинаковыми матрицами ковариации. В данном исследовании данные предположения выполнены.

Пусть X матрица наблюдений для нейтральных и стрессирующих вопросов.

$$X(p, m+n) = \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1m+n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{p1} & \dots & x_{pm+n} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Столбцы данной матрицы содержат реакции, как на нейтральные, так и на стрессирующие вопросы.

Первым шагом обработки данных является их нормировка по формуле

$$x_{ij}^H = \frac{x_{ij} - x_{i\min}}{x_{i\max} - x_{i\min}}. \quad (2)$$

Здесь $x_{i\max}$, $x_{i\min}$ – максимальные и минимальные значения параметров в i -ой строке. Далее индекс « n » будем опускать. Разобьем матрицу $X(p, m+n)$ на две матрицы, содержащие реакции на нейтральные и стрессирующие вопросы соответственно.

$$X(p, m) = \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{p1} & \dots & x_{pm} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$Y(p, n) = \begin{pmatrix} y_{11} & \dots & y_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{p1} & \dots & y_{pn} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

где m – количество нейтральных вопросов; n – количество стрессирующих вопросов; p – количество переменных;

Среднее значение:

$$M_X = \begin{pmatrix} \mu_{x_1} \\ \vdots \\ \mu_{x_k} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$M_Y = \begin{pmatrix} \mu_{y_1} \\ \vdots \\ \mu_{y_k} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где

$$\mu_{x_i} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m x_{ij}, \quad (7)$$

$$\mu_{y_i} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n y_{ij}. \quad (8)$$

Выборочные ковариационные матрицы вычисляются по формулам (9) и (10):

$$C_X = \frac{(X - M_X) \cdot (X - M_X)^T}{m-1}, \quad (9)$$

$$C_Y = \frac{(Y - M_Y) \cdot (Y - M_Y)^T}{n-1}. \quad (10)$$

Объединенная ковариационная матрица C_{XY} определяется следующим образом:

$$C_{XY} = \frac{(m-1) \cdot C_X + (n-1) \cdot C_Y}{m+n-2}. \quad (11)$$

Коэффициенты дискриминантной функции определяются по формуле(12):

$$\vec{a} = (C_{XY})^{-1} \cdot (M_X - M_Y), \quad (12)$$

где $(C_{XY})^{-1}$ - обратная матрица C_{XY} .

Значения дискриминантной функции для 1-класса (нейтральный):

$$f_1 = (a^T \cdot X)^T = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^k a_i \cdot x_{i1} \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^k a_i \cdot x_{im} \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Значения дискриминантной функции для 2-класса (стрессирующий):

$$f_2 = (a^T \cdot Y)^T = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^k a_i \cdot y_{i1} \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^k a_i \cdot y_{in} \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Значение средней дискриминантной функции для 1-класса (нейтральный):

$$f_{1m} = a^T \cdot M_x = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^k a_i \cdot \sum_{j=1}^m x_{ij}. \quad (15)$$

Значение средней дискриминантной функции для 2-класса (стрессирующий):

$$f_{2m} = a^T \cdot M_y = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^k a_i \cdot \sum_{j=1}^n y_{ij}. \quad (16)$$

Константа дискриминации вычисляется по формуле:

$$C = \frac{1}{2} \cdot (f_{1m} + f_{2m}). \quad (17)$$

Здесь предполагается, что априорные вероятности принадлежности объектов первому и второму классам равны 0,5. Стоимости ошибочной классификации одинаковы.

После получения константы дискриминации можно провести классификацию новых объектов (контрольные вопросы). Пусть матрица $Z(p, k)$ содержит параметры контрольных вопросов, k – количество контрольных вопросов. Для того чтобы отнести эти вопросы к одному из двух классов, рассчитаем для них значения дискриминантных функций по формуле:

$$f_z = (a^T \cdot Z)^T. \quad (18)$$

Если $f_{z_j} \geq C$ (j меняется от 1 до k), то неизвестный j -порядковый вопрос в матрице Z принадлежит к первому классу, т.е. к нейтральным вопросам. Аналогично, если $f_{z_j} < C$, то неизвестный вопрос в матрице Z принадлежит ко второму классу.

Значение дисперсии дискриминантной функции оценивается по формуле:

$$S_f^2 = a^T \cdot C_{xy} \cdot a. \quad (19)$$

Выборочное расстояние Махаланобиса вычисляется по формуле:

$$D^2 = \frac{(f_1 - f_2)^2}{S_f^2}. \quad (20)$$

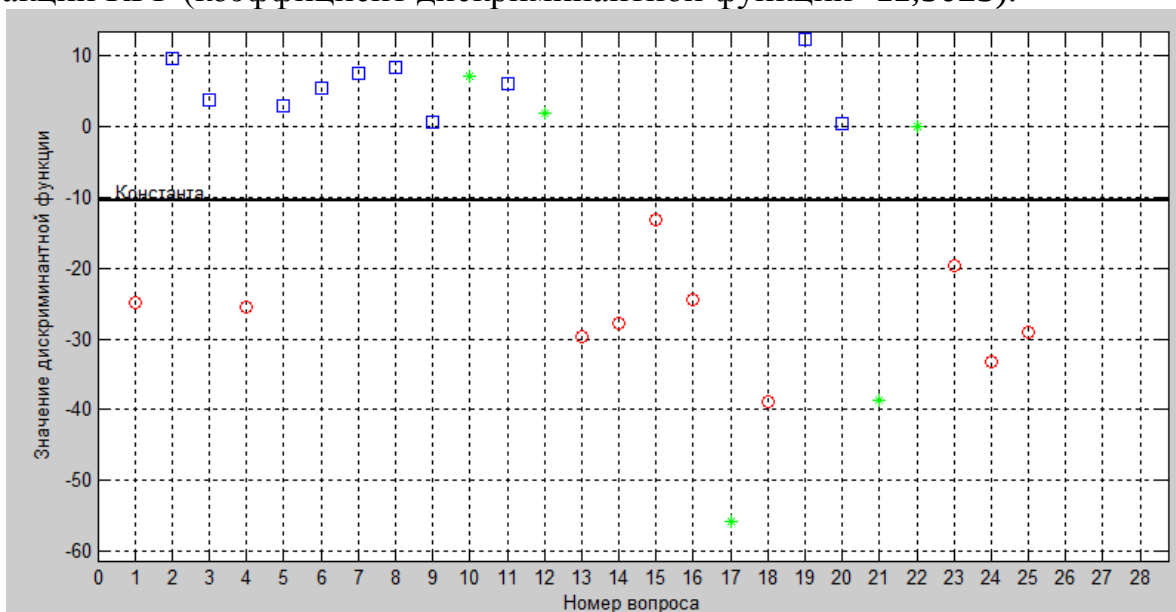
Оценки вероятности ошибок первого и второго рода одинаковы и вычисляются по формуле (21):

$$\text{Pr} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{-D/2} e^{\frac{-t^2}{2}} dt. \quad (21)$$

Здесь t – переменная интегрирования.

Данный алгоритм был реализован в программном пакете Matlab.

Далее приводим пример обработки исследуемого № 5, рисунок 3. По оси ординат представлена шкала значений дискриминантной функции, по оси абсцисс номера вопросов. Анализ показал, что наиболее значимыми параметрами в оценке ПЭС для данного исследуемого являются размах скачка ЭЭГ (коэффициент дискриминантной функции -50,1881), время до скачка ЭЭГ (коэффициент дискриминантной функции -24,8103) и время реакции КГР (коэффициент дискриминантной функции -11,5023).



□ – спокойные вопросы, ○ – волнующие вопросы, * – дополнительные вопросы

Рисунок 3 – Распределение данных по областям

Для более детального рассмотрения сигналов по амплитуде и длительности, разработан алгоритм для детектирования импульсов на ЭЭГ и КГР и микропотенциалов (МП) на ЭКГ, рисунок 4. В соответствии с данным алгоритмом разработана программа.

В блоке 2 задается временной интервал сигнала для анализа импульсов и МП. Для уменьшения погрешности в оценке импульсов и МП в блоке 3 производится выравнивание начала и конца интервала сигнала. Это позволит детектирующему алгоритму, основанному на производной первого порядка, искать экстремумы в сигнале, которые определяют наличие импульса и МП. Далее на (4–7) этапах определяются импульсы и МП с помощью фильтров с различными частотами среза. Обнаруженный импульс и МП вычитается из сигнала после его детектирования для исключения повторного учета. Все найденные импульсы МП отображаются на гистограммах, реализуемых в блоке 8. В программе для детектирования импульсов и МП предусмотрено

вычисление количества импульсов и МП с заданным шагом как по амплитуде, так и по времени. Минимальное значение шага гистограммы 0,1 мкВ и 0,1 мс.

В четвертой главе разработана программа и методики предварительных исследований ПЭС на добровольцах.

Научная новизна программы

Разработанный аппаратно-программный комплекс (далее АПК) на наносенсорах для съёма биопотенциалов кожи (КГР), мозга (ЭЭГ) и сердца.

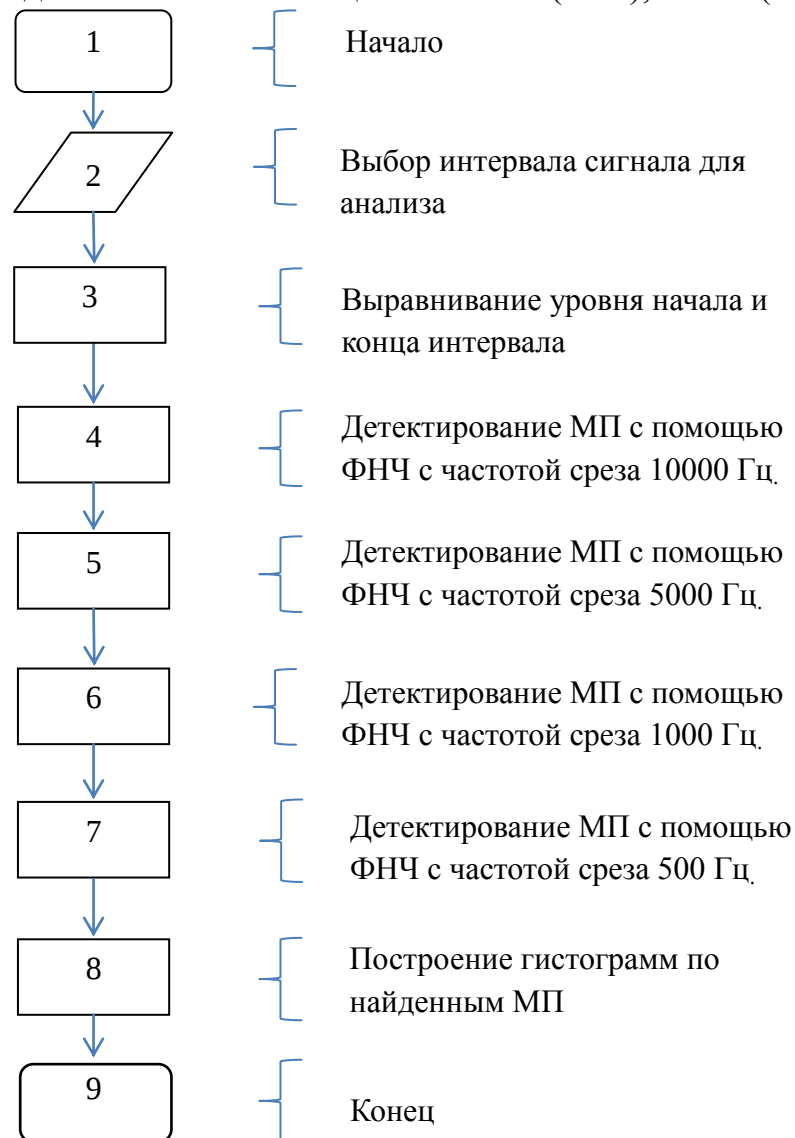


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма детектирования импульсов и МП

(ЭКГ) позволит впервые осуществлять широкополосную регистрацию биопотенциалов в полосе частот от 0 до 10000 Гц уровнем от 1 мкВ с частотой дискретизации 64 кГц без фильтрации в измерительных каналах.

Появление возможности регистрации данных сигналов открывает новые перспективы для специалистов в области психофизиологии по исследованию психоэмоционального состояния человека.

Цели, задачи, практическое значение программы

Разрабатываемая программа предварительных исследований должна позволить оценить возможности применения АПК на наносенсорах для

оценки ПЭС человека. Учитывая, что один из каналов АПК предназначен для исследования сердца, исследования психоэмоционального состояния проводились на добровольцах в Томском НИИ кардиологии.

Практическое значение программы состоит в разработке нового инструмента для оценки ПЭС человека, эффективности методов лечения и профилактики, направленных на снижение заболеваний, связанных с расстройством психики человека.

Проведение клинического исследования было одобрено локальным этическим комитетом по биомедицинской этике при НИИ кардиологии протокол №147 от 28.06.2016 г. В демонстрационных материалах, приведенных в результатах исследования, соблюдена конфиденциальность обследованных добровольцев.

Дизайн исследования

Исследование проводится в виде вопросов, на которые исследуемый отвечает «Да» или «Нет», при этом исследуемый должен быть в состоянии покоя. При тестировании для выявления эмоционального ответа у добровольцев использовался ряд вопросов: спокойные (нейтральные) и волнующие (стрессорирующие). Для формирования вопросника использовалась методика по Варламову. На рисунке 5а показаны места для определения кожно-гальванической реакции. Наносенсоры накладываются на фалангу указательного и безымянного пальцев.

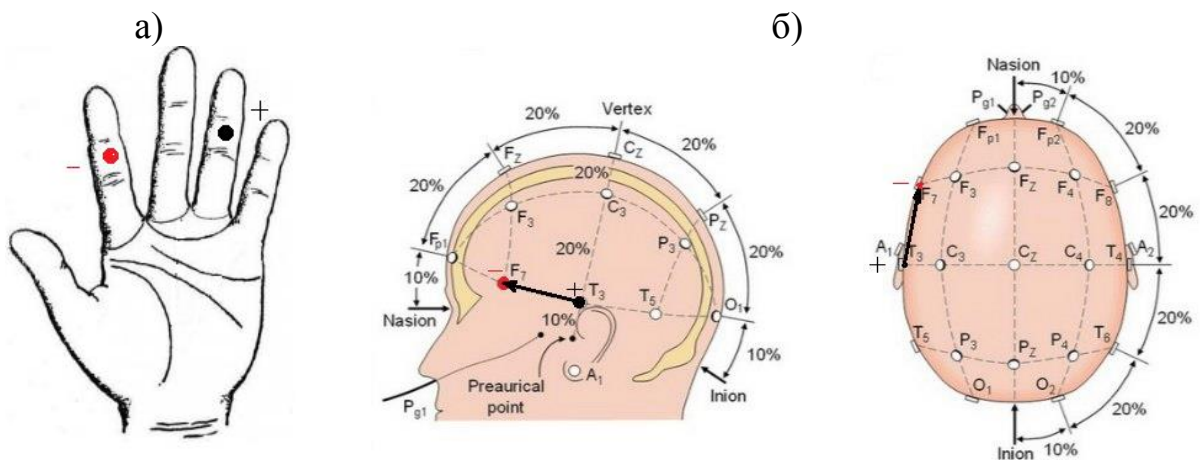


Рисунок 5 – отведение КГР (а) и ЭЭГ (б)

Электрокардиограмму снимали с грудной клетки с 1 отведения по Холтеру, земля справа.

Для электроэнцефалограммы используется биполярное отведение, находящееся над лимбической системой, в точках Т3 и Т7, согласно международной системы 10-20%, рисунок 5б. Данная система отвечает за эмоциональное состояние человека.

Для правильной компоновки вопросы чередуются: за спокойным обязательно должен следовать волнующий и наоборот.

При проведении теста записывается время начала тестирования, время начала каждого вопроса, интервал между вопросами составлял 30 с. Данная запись требуется для дальнейшей работы с полученными данными после

тестирования.

1 Должны быть проанализированы следующие параметры зарегистрированных сигналов:

- Изменение КГР – ΔU – КГР-1 (мкВ).
- Время реакции КГР-1 (с).
- Время до реакции КГР-1 (с).
- Изменение КГР – ΔU – КГР-2 (мкВ).
- Время реакции КГР-2 (с).
- Время до реакции КГР-2 (с).

Пример – исследуемый 11, рисунок 6.

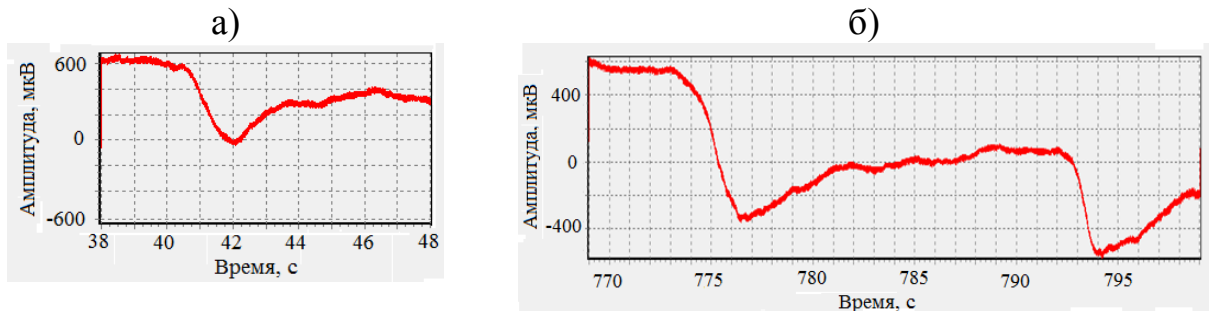


Рисунок 6 – Изменение КГР: а) спокойный вопрос - начало вопроса 40 с, конец 43 с, вопрос 2; б) волнующий вопрос - начало вопроса - 773 с, конец - 776 с, вопрос 26

- Размах импульсов КГР (мкВ).
- Количество импульсов на КГР.
- Время до реакции импульсов на КГР (с).
- Длительность импульсов реакции на КГР (с).

Пример - исследуемый 4, рисунок 7.

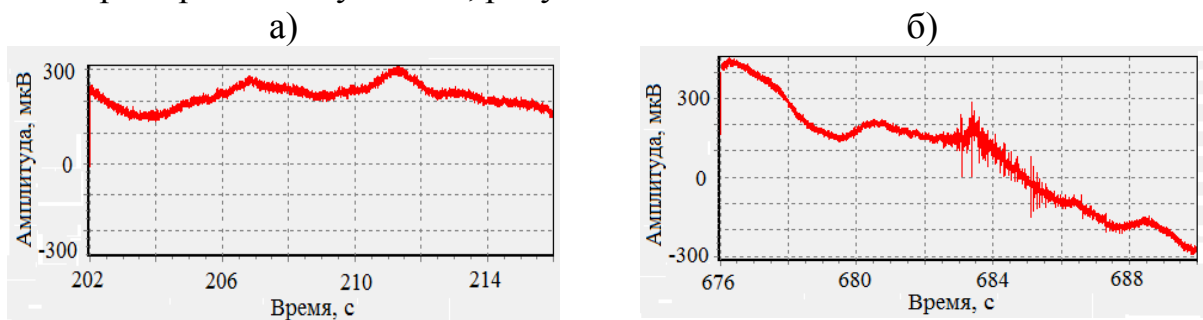
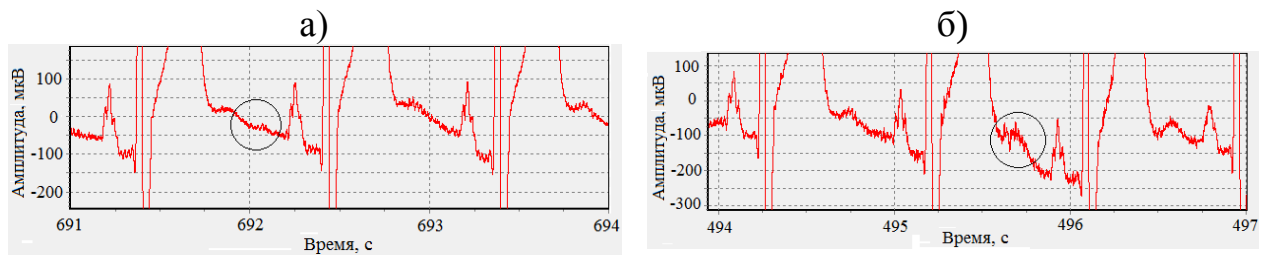


Рисунок 7 – Импульсы на КГР: а) спокойный вопрос - начало вопроса 206 с, конец 209 с, вопрос 7; б) волнующий вопрос - начало вопроса 677 с, конец 681 с, вопрос 21

- Изменение ЧСС.
- Изменение микропотенциалов на ЭКГ.

Пример – исследуемый 6, рисунок 8.



а) спокойный вопрос - начало вопроса 691 с, конец 694 с, вопрос 22; б) волнующий вопрос - начало вопроса 494 с, конец 498 с, вопрос 16

Рисунок 8 – Изменение микропотенциалов на ЭКГ:

- Изменение формы Р-волны.

Пример – исследуемый 13, рисунок 9.

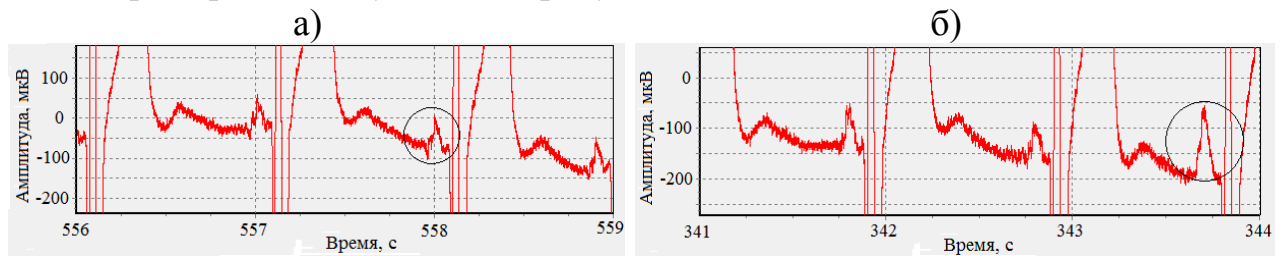


Рисунок 9 – Изменение формы Р-комплекса на ЭКГ: а) спокойный вопрос - начало вопроса 556 с, конец 560 с, вопрос 16; б) волнующий вопрос –начало вопроса 341 с, конец 344 с, вопрос 10

- Размах импульсов ЭЭГ(мкВ).

- Время до реакции импульсов ЭЭГ(с).

- Длительность импульсов ЭЭГ(с).

Пример – исследуемый 12, рисунок 10.

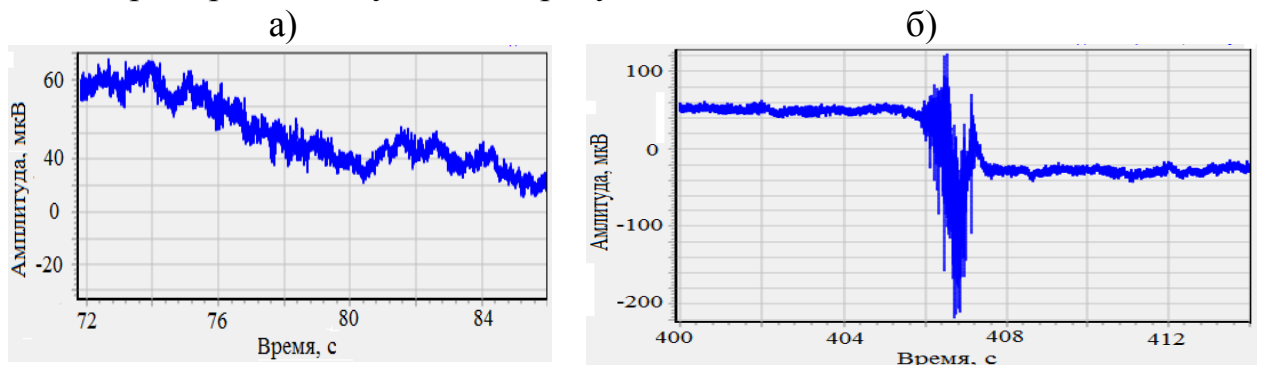


Рисунок 10 – Размах импульсов ЭЭГ: а) спокойный вопрос - начало вопроса 76 с, конец 78 с, вопрос 3; б) волнующий вопрос – Начало вопроса 401 с, конец 407 с, вопрос 13

- Размах скачка на ЭЭГ-1(мкВ).

- Длительность скачка на ЭЭГ-1(с).

- Время до скачка ЭЭГ-1 (с).

- Размах скачка на ЭЭГ-2(мкВ).

- Длительность скачка наЭЭГ-2(с).

- Время до скачка ЭЭГ-2 (с).

Пример - исследуемый 13, рисунок 11.

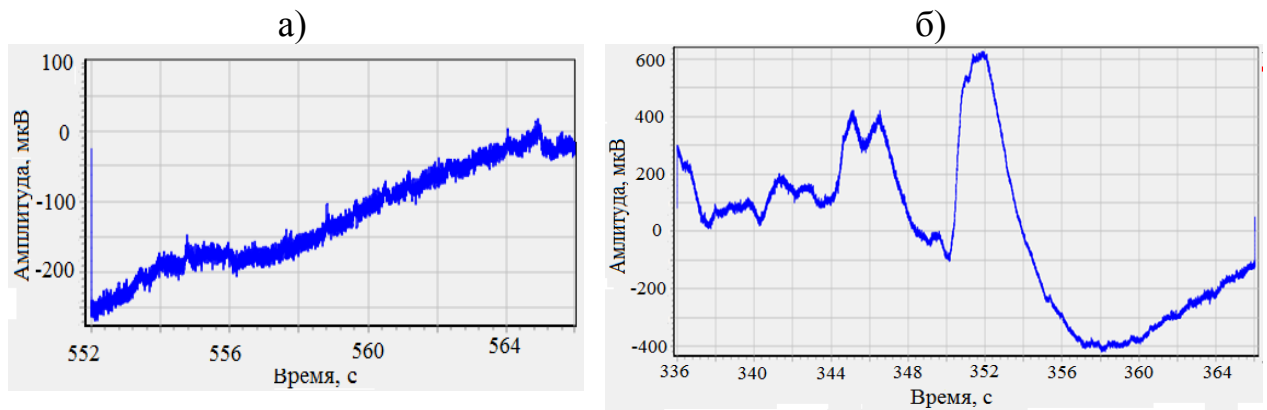


Рисунок 11 – Размах скачков на ЭЭГ: а) спокойный вопрос - начало вопроса 556 с, конец 560 с, вопрос 16; б) волнующий вопрос – Начало вопроса 341 с, конец 344 с, вопрос 10

2 С помощью линейного дискриминантного анализа (ЛДА) определить значимость каждого параметра для деления вопросов на два класса.

3 Провести оптимизацию количества параметров и вопросов для устойчивого деления вопросов на спокойные и волнующие.

В пятой главе сделан анализ результатов предварительных исследований ПЭС на добровольцах.

Исследования проводились на группе людей, состоящей из 13 человек. Все исследуемые входили в возрастную категорию от 22 до 26 лет, не имели физических отклонений и заболеваний. Перед началом исследования исследуемые были ознакомлены с методикой проведения тестирования и давали письменное согласие для проведения исследования.

Полученные результаты тестирования были разделены на 2 типа вопросов:

- 1) Спокойные (нейтральные), которые не вызывают сильные эмоции.
- 2) Вопросы, которые могут вызвать волнение волнующие (стрессорирующие).

В процессе исследования осуществлялась запись хронограммы с интервалом в 30 секунд, регистрировалось время начала и конца вопроса.

Приведем пример анализа зарегистрированных сигналов исследуемого 1. Исследуемому 1 было задано 23 вопроса, на которые можно было ответить либо «Да», либо «Нет». При исследовании регистрировалось время начала и конца вопроса, а так же, ответ на сам вопрос. Результаты записи биоэлектрических потенциалов КГР, ЭЭГ и ЭКГ анализировались по упомянутым выше параметрам. Среди параметров была выделена группа значимых, которые использовались для классификации реакций на вопросы по двум группам. Деление реакций испытуемого 1 на группы по параметрам осуществлялось методом ЛДА. В таблице 2 представлено распределение параметров по степени уменьшения значения коэффициента дискриминантной функции. Проводилась оптимизация количества параметров и вопросов, необходимых для распределения реакций на вопросы по группам методом ЛДА.

Таблица 2 – Распределение параметров по степени уменьшения значения коэффициента дискриминантной функции

1 ΔU - КГР(мкВ)	-16.3789
2 Количество импульсов на КГР	-11.7100
3 Длительность импульсов ЭЭГ(с)	-11.6837
4 Изменение ЧСС	7.8560
5 Время до реакции ЭЭГ(с)	6.3946
6 Размах импульсов КГР(мкВ)	4.8032
7 Размах ЭЭГ(мкВ)	3.1371
8 Длительность импульсов реакции на КГР(с)	2.9561
9 Время реакции КГР(с)	-0.6275
10 Время до реакции импульсов на КГР(с)	0.4884

По результатам анализа испытуемого 1 можно сделать вывод, что устойчивое деление на классы вопросов возможно при использовании 3-х наиболее значимых параметров, количество вопросов должно быть не менее 4. Психофизиолог при повторных исследованиях данного исследуемого может с меньшими временными затратами проводить исследования.

Анализ результатов исследования 13 исследуемых показал, что наиболее значимыми параметрами для ПЭС при исследовании на АПК высокого разрешения являются: длительность импульсов ЭЭГ (с), размах импульсов ЭЭГ (мкВ), время реакции КГР (с), время до реакции импульсов ЭЭГ (с), размах скачка на ЭЭГ-1(мкВ), Изменение КГР- ΔU – КГР-1 (мкВ), количество импульсов на КГР, изменение ЧСС.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные результаты исследований и выводы:

1) Разработка технических средств и методов оценки ПЭС, регистрирующих сигналы в расширенном диапазоне частот от 0 до 10000 Гц без фильтрации и усреднения с высокой частотой регистрации и высоким разрешением по уровню является актуальной задачей и позволит получить новую информацию об уровнях сигналов и времени реакции на стрессирующее воздействие, неискаженное фильтрами.

2) Разработан трехканальный аппаратно-программный комплекс на наносенсорах для регистрации ЭКГ, КГР и ЭЭГ в реальном времени в широкой полосе частот от 0 до 10000 Гц, уровнем от 1 мкВ, с частотой дискретизации 64 кГц без фильтрующих звеньев в измерительной цепи для оценки ПЭС.

3) Разработано специальное устройство для наложения левой и правой руки для съема наносенсорами ЭКГ и КГР для оценки ПЭС, приемлемое для массовых исследований.

4) Дано описание алгоритма обработки электрофизиологических сигналов методом линейного дискриминантного анализа (ЛДА) для оценки ПЭС человека.

5) Разработана программа в программном пакете Matlab для классификации вопросов на 2 группы по параметрам зарегистрированных

наносенсорами сигналов в полосе от 0 до 10000 Гц, основанная на методе ЛДА.

6) Разработан алгоритм и программа для детектирования и подсчёта количества импульсов на зарегистрированных сигналах КГР, ЭКГ и ЭЭГ с заданным шагом.

7) Разработана программа и методики исследования ПЭС на добровольцах, в которую включены следующие новые параметры для исследования ПЭС в полосе частот от 0 до 10000 Гц:

- Размах импульсов КГР(мкВ).
- Количество импульсов на КГР.
- Время до реакции импульсов на КГР(с).
- Длительность импульсов реакции на КГР(с).
- Изменение микропотенциалов на ЭКГ.
- Изменение формы Р-волны.
- Размах скачка на ЭЭГ-1(мкВ).
- Длительность скачка на ЭЭГ-1(с).
- Время до скачка ЭЭГ-1 (с).
- Размах скачка на ЭЭГ-2(мкВ).
- Длительность скачка на ЭЭГ-2(с).
- Время до скачка ЭЭГ-2 (с).

8) По данным обработки 13 добровольцев методом ЛДА сделан вывод, что наиболее значимыми параметрами при исследовании ПЭС на АПК высокого разрешения являются: длительность импульсов ЭЭГ(с), размах импульсов ЭЭГ(мкВ), время реакции КГР(с), время до реакции импульсов ЭЭГ (с), размах скачка на ЭЭГ-1(мкВ), изменение потенциала ΔU – КГР-1(мкВ), количество импульсов на КГР, изменение ЧСС. Из них впервые исследуются с высокой точностью размах скачка на ЭЭГ-1(мкВ) и количество импульсов на КГР.

9) При исследовании ПЭС в широкой частотной полосе реакции на волнующие вопросы качественно отличаются от стандартных полиграмм, реакции более ярко выражены.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Нгуен Д.К. Обзор методов и систем исследования эмоционального стресса человека [Электронный ресурс] / Нгуен Д.К., Южаков М.М., Авдеева Д.К.// Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2. – с. 1-11. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/129-22753> (дата обращения: 10.11.2015).

Статьи в изданиях из базы данных Scopus:

2. Nguyen D.Q. Advantages of Nanosensors in the Development of Interfaces for Bioelectric Prostheses / Avdeeva D.K., Zakharchenko E., Nguyen

D.Q., Turushev N.V., Abdrakhmanov A., Tverdokhlebov S. // MATEC Web of Conferences. – 2016. – № 79. – с. 1-9.

3. Nguyen D.K.. Development and investigation of the nanosensor-based apparatus to assess the psycho-emotional state of a person / Avdeeva D.K., Nguyen D.K., Ivanov M.L., Natalinova N.M., Rybalka S.A., Turushev N.V. // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. – 2017. - № 881. – с. 1-6.

4. Nguyen D.K. Methods and Approaches for Automatic Processing and Storage of High-Potential Electrocardiogram Registered by Hardware and Software Complex on Nanosensors / Rybalka S., Yuzhakov M.M., Nguyen D.K., Ivanov M.L., Kodermjatov R., Wenjia G., Maksimov I., Zimin I. // MATEC Web of Conferences. – 2018. – № 155. – с. 1-7.

Свидетельства о государственной регистрации:

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018612832 (RU); заявка № 2018610071 от 09.01.2018, дата рег. 01.03.2018; Бюл. № 1 от 01.03.2018 // Нгуен Д.К., Иванов М.Л., Турушев Н.В., Детектирование элементов в кардиосигнале.

Статьи в других изданиях:

6. Нгуен Д.К. Обзор электрофизиологических методов оценки состояния человека // Материалы II Международная научная конференция: «Иностранный язык в контексте проблем профессиональной коммуникации», 27-29 апреля 2015 г. – Томск : ТПУ, 2015 – с. 199-201.

7. Nguyen D.Q. Methods to assess psychoemotional state of a person / Nguyen D.Q., Yuzhakova M.A. // Неразрушающий контроль: сборник трудов V Всероссийской научно-практической конференции «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность». В 2 т., Томск, 25-29 Мая 2015. - Томск: ТПУ, 2015 - Т. 2 - с. 460-463.

8. Нгуен Д.К. Обзор методов оценки психоэмоционального состояния человека / Нгуен Д.К., Южаков М.М. // Материалы VI Научно-практическая конференция с международным участием «Информационно-измерительная техника и технологии» 27-30 мая 2015 г. – Томск: ТПУ, 2015 – с. 108-111.

9. Nguyen D.Q. Electrophysiological methods to assess emotional stress of human body // Сборник научных трудов III Международной научной конференции «Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине» Томск, 23-26 мая 2016. - Томск: ТПУ, 2016 – с. 629-631.

10. Нгуен Д.К. Преимущества использования наносенсоров в разработке интерфейсов для биоэлектрических протезов / Авдеева Д.К., Нгуен Д.К., Захарченко Е.А., и др. // Материалы VII Научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии» с международным участием 25-28 Мая 2016 г. – Томск: ТГУ, 2016 – с. 503-513.

11. Nguyen D.Q. Electrophysiological methods to assess psycho-emotional state of a person based on medical nanosensors // Сборник научных трудов VIII Международной научно-практической конференции «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине» Томск, 1-3 июня 2016. - Томск: ТПУ, 2016 - с. 121-122.

12. Нгуен Д.К. Перспективы применения наносенсоров в неинвазивном исследовании электрической активности групп кардиомиоцитов человека / Нгуен Д.К., Абдрахманов А.Б. // Сборник научных трудов XXIII Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых, 1-5 Апреля 2017. – г. Екатеринбург: УФУ, 2017 – с. 314-315.

13. Нгуен Д.К. Разработка и исследование аппаратуры на наносенсорах для оценки психоэмоционального состояния человека / Нгуен Д.К., Авдеева Д.К, Иванов М.Л, и др. // Сборник тезисов IV Международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле SIBTEST 2017, 26-30 Юня 2017 г. – г. Новосибирск, 2017 – с. 106-108.