

19. Sokolovski S.G., Rafailov E.U., Abramov A.Y., Angelova P.R. Singlet oxygen stimulates mitochondrial bioenergetics in brain cells // *Free Radic. Biol.* 2021. Vol. 163. PP. 306-313.
20. Novikova I.N., Potapova E.V., Dremine V.V., Dunaev A.V., Abramov A.Y. Laser-induced singlet oxygen selectively triggers oscillatory mitochondrial permeability transition and apoptosis in melanoma cell lines // *Life Sci.* 2022. Vol. 304. P. 120720.
21. Volkov M.V., Margaryants N.B., Potemkin A.V., Machikhin A.S., Khokhlov D.D., Batshev V.I., Danilychev M.V. Blood vessel visualization method in human skin based on video recording of blood flow using a laparoscope // *J. Commun. Technol.* 2020. Vol. 65 (7). PP. 806-814.
22. Yoshino F., Shoji H., Lee M.-C. Vascular effects of singlet oxygen (1O₂) generated by photo-excitation on adrenergic neurotransmission in isolated rabbit mesenteric vein // *Redox Rep.* 2002. Vol. 7 (5). PP. 266-270.

*Андрей Валерьевич Дунаев,
д-р техн. наук, доцент,
ведущ. научный сотрудник,
Елена Владимировна Потапова,
канд. техн. наук, доцент,
ст. научный сотрудник,
научно-технологический центр
биомедицинской фотоники,
Юлия Игоревна Локтионова,
магистрант,*

*кафедра приборостроения, метрологии
и сертификации,
стажер-исследователь,
научно-технологический центр
биомедицинской фотоники,
Екатерина Олеговна Брянская,
стажер-исследователь,
научно-технологический центр
биомедицинской фотоники,
Ксения Юрьевна Кандурова,
аспирант,
кафедра приборостроения, метрологии
и сертификации,
стажер-исследователь,
научно-технологический центр
биомедицинской фотоники,
Ирина Николаевна Новикова,
канд. техн. наук, доцент,
ст. научный сотрудник,
научно-технологический центр
биомедицинской фотоники,
ФГБОУ ВО «Орловский государственный
университет им. И.С. Тургенева»,
г. Орел,
e-mail: dunaev@bmecenter.ru*

Р.В. Исаков

Научные разработки в области исследования работы головного мозга человека

Аннотация

Представлен обзор научных работ, проводимых на кафедре электроники, приборостроения и биотехнических систем Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых в области исследования работы головного мозга человека. Представленные работы посвящены разработке средств получения сигналов и методов цифровой обработки и анализа информации о функциональном состоянии высшей нервной деятельности человека. В качестве информационных сигналов использовались электроэнцефалографический, кардиоинтервалографический и виброакустический сигналы головного мозга.

Введение

Проблема исследования головного мозга человека и объективное познание его психической деятельности является одной из важнейших задач, стоящих перед наукой. Особенностью этой задачи является то, что исследуемая система крайне сложна по сравнению с инструментами ее анализа. О данной проблеме высказывались еще древние философы, такие как Гиппократ, Аристотель, Декарт и др. Но и в настоящее время уровень познания мозга ограничивается определением его примерных функциональных зон и локализацией сигналов патологической активности, тогда как многие аспекты связи психической деятельности с внешними проявлениями в виде сигналов остаются неизученными. Важной задачей здесь является поиск новых подходов к исследованию мозга, позволяющих получить информацию о процессах его функционирования.

На кафедре электроники, приборостроения и биотехнических систем Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых несколько лет ведутся научные работы в области исследования работы головного мозга человека.

Комплекс научных работ включает в себя разработку средств получения сигналов и методов цифровой обработки и анализа данных.

В качестве информационных сигналов использовались как довольно известные электроэнцефалографический, кардиоинтервалографический сигнал, так и малоизученный виброакустический сигналы головного мозга.

Материалы и методы

Для получения информации о функциональном состоянии головного мозга применяются различные технические методы получения сигналов. В работе [1] представлена концепция универсальной системы регистрации и анализа биоэлектрических сигналов.

Здесь для получения биосигналов предлагается использовать усилитель биоэлектрических сигналов с широкой полосой пропускания, которая включает в себя частотные диапазоны практически всех биоэлектрических сигналов. Выделение полезного сигнала предполагается проводить при помощи цифровых фильтров, находящихся в компьютере. Также в таком регистраторе обеспечивается регулировка коэффициента усиления измерительного каскада в широких пределах для обеспечения подстройки аппаратной части под тот или иной биоэлектрический сигнал. Таким образом, даже при помощи одного такого измерительного канала можно регистрировать множество различных биоэлектрических сигналов, применяя при этом одну программу обработки и анализа.

Для анализа сигналов применяются различные известные методы, сгруппированные в следующие модули:

- модуль временного анализа;
- модуль спектрального (в том числе частотно-временного) анализа;
- модуль графического анализа;
- модуль нелинейного анализа;
- модуль динамического анализа и т. п.

Данная концепция может быть применена для проведения исследования центрального управления различными органами и системами организма человека. Изложенные принципы построения систем можно встретить в исследовательских и образовательных комплексах.

Одной из важнейших систем организма является сердечно-сосудистая система, и с точки зрения теории систем патологические процессы в ней могут развиваться вследствие нарушения по тем или иным причинам процессов управления. Известно, что именно головной мозг осуществляет централизованное управление сердечно-сосудистой системой человека, а значит, актуальной задачей является отслеживание взаимосвязи между функциональным состоянием головного мозга и электрическими проявлениями работы сердца. Для решения этой задачи в работе [2] описывается специализированный блок совместной регистрации ЭКГ- и ЭЭГ-сигналов.

Объединение этих двух методов важно для проведения исследований взаимозависимости нервной и сердечно-сосудистой систем человеческого организма. Это дает возможность исследователям выявить новые, неизвестные ранее причины возникновения заболеваний, обеспечить достоверную диагностику и правильное последующее лечение.

В работе [2] рассматриваются возможный вариант электронного цифрового блока параллельной регистрации ЭКГ и ЭЭГ человека и алгоритм работы микропроцессорного блока, основанный на концепции построения системы, изложенной в работе [1].

В структурную схему комплекса входят: электроды отведений, блок усиления и фильтрации, интерфейсное устройство для связи с компьютером и соответствующее программное обеспечение.

Еще одним подходом, используемым для анализа функционального состояния головного мозга, является исследование его виброакустической активности. Ведь функционирование организма, кроме электрических, имеет и механические проявления, например сокращение мышц, движение крови в сосудах. Для этой цели разрабатывалась экспериментальная система виброакустического исследования организма [3], объединяющая в себя сразу несколько классических технических методов диагностики (фонокардиография, баллистокордиография, плетизмография, сфигмография, респирография и др.). Для исследования головного мозга была применена регистрация колебаний структур головного мозга, описанная в работе А.П. Ефимова, но ограничивающаяся вычислением внутричерепного давления [4]. Однако работа мозга сопровождается пульсацией сосудов внутри него, причем активация разных отделов головного мозга провоцирует перераспределение активности источников этих механических колебаний. Суммируясь, эти колебания заставляют лобную кость вибрировать, поэтому по характеру данных микровибраций можно судить о функциональном состоянии головного мозга.

Результаты

Основные результаты научных разработок были получены в области оценки высшей нервной деятельности при помощи анализа ЭЭГ-сигнала с целью автоматического выявления лживого состояния мозга. Такая задача актуальна для целей полиграфического исследования.

Одним из вариантов решения этой задачи является использование эффекта Р-300, основывающегося на обнаружении вызванных потенциалов головного мозга. В работе [5] предлагался подход для обнаружения вызванных потенциалов головного мозга на примере звуковой стимуляции. Там прора-

батывались его методические и математические составляющие.

Дальнейшее развитие этот подход получил в работе [6] по созданию системы полиграфических исследований на основе когнитивных вызванных потенциалов. Здесь рассматривается использование ЭЭГ-сигнала, позволяющего повысить достоверность и надежность результатов полиграфических исследований.

Все известные полиграфические системы в мире в основном устроены по одному принципу: фиксируют фон психофизиологических реакций человека и изменение фона после получения соответствующей информации (тестовые вопросы или визуальные образы). Компьютерная программа в автоматическом режиме сравнивает и анализирует полученные результаты, выдавая оценку психофизиологического стресса при поступлении к испытуемому новой информации. Использование активности головного мозга как психофизиологического метода оценки эмоционального напряжения, регистрируемого в нем во время проверки, может выявить скрываемую человеком информацию.

Методика работы системы заключается в распознавании когнитивных вызванных потенциалов головного мозга Р-300, нахождении отклонений от нормы ритма дыхания и записи кожно-гальванической реакции во время стимуляции. В качестве когнитивного стимула был использован показ фотографий с изображением портретов людей. Поэтому при обнаружении знакомого человека независимо от испытуемого должен выработаться вызванный потенциал Р-300.

Другим вариантом решения задачи определения лживого состояния головного мозга являются результаты исследования, опубликованные в работах [7], [8], проводимых совместно с научно-исследовательским институтом нормальной физиологии имени П.К. Анохина. Здесь был выбран иной подход к решению задачи: выявлялись те зоны мозга, которые имели достоверное изменение состояния при попытке человека солгать. Причем в качестве математического аппарата для проведения анализа сигнала ЭЭГ применялась технология непрерывного вейвлет-преобразования. Она дает возможность отследить распределение спектральной энергии не только по разным частотным диапазонам, но и в разные периоды времени.

В работе [7] ставилась цель распознавания в психической деятельности мозга процесса извлечения информации из памяти, чтобы объективно оценить факт успешного воспоминания человеком ответа на поставленный вопрос.

В работе [8] разрабатывалась технология распознавания правдивого и лживого состояний мозга человека на основе регистрации электроэнцефалограммы отдельных корковых структур мозга. В проведенном исследовании показана принципиальная возможность выявления в деятельности мозга лживого или правдивого мысленного ответа на основе непрерывного вейвлетного анализа ЭЭГ отдельных корковых структур мозга человека. Установлены критерии участия разных структур мозга в формировании мысленного лживого или правдивого состояния.

Впоследствии на основании данных результатов был предложен вариант построения биотехнической системы определения лжи на базе только электроэнцефалографического сигнала [9]. Эта система является, по существу, нейрокомпьютерным интерфейсом, поэтому устно отвечать человеку необязательно, достаточно только подумать об ответе на показанный вопрос.

Развитие метода виброакустического исследования мозга продемонстрировано в работах [10]-[12]. Здесь был представлен новый способ получения информации о функциональном состоянии мозга на основе регистрации микровибраций на поверхности черепной коробки [10]. При помощи разработанных аппаратных средств получения данного сигнала [3] были проведены экспериментальные исследования возможности данной технологии анализа.

В связи с малой изученностью данного сигнала и влияющих на него факторов был проведен корреляционный анализ

зависимости спектральных составляющих виброакустического сигнала головного мозга от различных факторов как внешней, так и внутренней среды, результаты которого представлены в работе [11].

Было выявлено, что колебания структур головного мозга могут модулироваться различными климатическими факторами, такими как атмосферное давление, температура и влажность воздуха, а также артериальным давлением. Причем влияние этих факторов зависит и от индивидуальных особенностей человека. Исследование сигнала показало, что информация находится в частотной области. Спектр сигнала сконцентрирован в инфранизкочастотной области до 45 Гц с максимумом в районе 0...10 Гц.

Полученные знания о виброакустическом сигнале головного мозга дали возможность применить его для решения прикладной задачи контроля функционального состояния мозга оператора [12].

В результате исследований выявлена зависимость функционального состояния мозга от параметров его микродвижений. Представлен алгоритм обработки полученного сигнала на основе частотно-временного преобразования и технологии машинного обучения нейронных сетей, позволяющий идентифицировать предсонное и тревожное состояния головного мозга. Рассмотрены вопросы корректного обучения соответствующих нейросетевых модулей, и показаны результаты тестирования на экспериментальных данных. Разработанная технология обеспечивает альтернативный подход к созданию систем контроля оператора как самостоятельно, так и в комплексе с другими средствами, например, совместно с предложенным в работе [13] подходом контроля предсонного состояния человека, основанного на анализе кардиоинтервалов сердца. Этот метод хорошо дополняет виброакустический подход, так как в сигнале микровибраций головного мозга выделяется компонента, связанная с частотой сердечных сокращений (пульсовая волна).

Заключение

На кафедре электроники, приборостроения и биотехнических систем Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых проводятся различные работы в области анализа функционирования головного мозга человека. Разрабатываются экспериментальные аппаратно-программные комплексы для получения новой информации о функциональном состоянии мозга. Выполняются поисковые исследования закономерностей в работе мозга на основе широко применяемого метода электроэнцефалографии. В работе применяются современные математические инструменты анализа, такие как вейвлет-преобразование и технология машинного обучения искусственных нейронных сетей.

Все рассмотренные в настоящей статье методы имеют перспективы практического применения.

Список литературы:

1. *Исаков Р.В., Сушкова Л.Т.* Система регистрации и анализа биоэлектрических сигналов / Доклады 6-й Межд. науч.-техн. конф. «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии». Владимир, 2008. С. 149-152.
2. *Аль Мабрук М., Исаков Р.В., Сушкова Л.Т.* Блок параллельной регистрации ЭКГ и ЭЭГ сигналов / Доклады 6-й Межд. науч.-техн. конф. «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии». Владимир, 2008. С. 131-136.

3. *Исаков Р.В., Алексеева И.И.* Биотехническая система регистрации вибро-акустических сигналов человека // Биотехносфера. 2017. № 5 (53). С. 28-31.
4. *Ефимов А.П.* Новый биомеханический метод неинвазивной оценки внутричерепного давления: верификация способа и цифрового аппарата // Российский журнал биомеханики. 2011. Т. 15. № 4 (54). С. 47-59.
5. *Коровина О.С., Исаков Р.В.* Метод обнаружения вызванных потенциалов / Доклады 10-й Межд. науч.-техн. конф. «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии». Владимир, 2012. Кн. 3. С. 136-138.
6. *Талев Е.М., Исаков Р.В.* Нейрокомпьютерная биотехническая система полиграфических исследований / 2-я Международная конференция с элементами научной школы «Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах». Тамбов, 22-24 апреля 2015 г. С. 455-457.
7. *Юматов Е.А., Каратыгин Н.А., Дудник Е.Н., Глазачев О.С., Филипенко А.И., Сушкова Л.Т., Исаков Р.В., Аль-Хайдри В.А., Перцов С.С.* Проявление памяти (воспоминания) в электроэнцефалограмме на основе вейвлет-преобразования // Биомедицинская радиоэлектроника. 2021. № 6. С. 37-45.
8. *Юматов Е.А., Каратыгин Н.А., Дудник Е.Н., Глазачев О.С., Филипенко А.И., Сушкова Л.Т., Исаков Р.В., Аль-Хайдри В.А., Перцов С.С.* Выявление лживого и правдивого состояний мозга человека на основе вейвлет-преобразования электроэнцефалограммы разных структур мозга // Биомедицинская радиоэлектроника. 2022. № 2-3. С. 84-89.
9. *Исаков Р.В.* Подход к построению биотехнической системы детекции лжи на основе электроэнцефалографии / Доклады 15-й Межд. научн. конф. «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии». Владимир, 2022.
10. *Исаков Р.В., Алексеева И.И.* Виброакустическое исследование функционального состояния головного мозга // Биотехносфера. 2018. № 3 (57). С. 51-58.
11. *Алексеева И.И., Исаков Р.В.* Исследование зависимости спектральных составляющих микровибраций головного мозга от артериального и атмосферного давления / Доклады 13-й Межд. научн. конф. «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии». Владимир, 2018. Кн. 2. С. 374-378.
12. *Исаков Р.В., Алексеева И.И.* Система виброакустического контроля функционального состояния мозга оператора // Биомедицинская радиоэлектроника. 2019. № 2. С. 30-37.
13. *Агафонова Е.В., Исаков Р.В.* Разработка метода определения предсонного состояния водителя / Доклады 13-й Межд. научн. конф. «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии». Владимир, 2018. Кн. 2. С. 46-50.

*Роман Владимирович Исаков,
канд. техн. наук, доцент,
кафедра «Электроника, приборостроение
и биотехнические системы»,
ФГБОУ ВО «Владимирский государственный
университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых»,
г. Владимир,
e-mail: Isakov-RV@mail.ru*