

УДК 04.021: 004.512.4

А.О. ИСХАКОВА, Д.А. ВОЛЬФ, А.Ю. ИСХАКОВ

## НЕИНВАЗИВНЫЙ НЕЙРОКОМПЬЮТЕРНЫЙ ИНТЕРФЕЙС ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ

Работа освещает актуальный вопрос автоматизации взаимодействия человека и робота, в том числе передачи управляющего сигнала с применением нейрокомпьютерного интерфейса для обмена информацией между мозгом и электронным устройством. В статье предлагается оригинальный подход для управления и решения задачи управления роботом с использованием технологии нейроинтерфейсов. Авторами описывается общая схема и принцип работы основной идеи неинвазивного нейроинтерфейсного управления роботом с использованием оригинальной сверточной нейронной сети. Также исследуется задача по разработке прототипа программного продукта для нейропилотирования и управления роботом в режиме «интерфейс мозг – компьютер» на основе извлечения и расшифровки устойчивого визуально вызванного потенциала системами возбуждения сетчатки глаза, электроэнцефалографии и сверточных нейронных сетей. Описаны принципы работы оригинальной сверточной нейронной сети, подход к современному дизайну сети, представлена модель одномерной сверточной сети на основе принципов работы внутреннего уха человека, а также диаграмма разработанной сверточной нейронной сети из 11-ти функциональных уровней (слоев) для преобразования сигналов электроэнцефалограммы. Предлагается структура программного комплекса.

**Ключевые слова:** робот, нейроинтерфейс, устойчиво визуально вызванный потенциал, электроэнцефалографии, сверточная нейронная сеть, комплекс программ.

### Введение

Перспективные направления развития киберфизики так или иначе связаны с повышением эффективности управления киберфизических систем [1, 2]. Среди них проведение прикладных научных исследований и разработок, направленных на создание продукции и технологии интеллектуальной роботоники [3]; создание оригинальных искусственных нейронных сетей для выработки управляющих сигналов в системах интеллектуального управления и решения задач управления динамическими объектами роботехники [4, 5]; создание гетерогенных интеллектуальных систем человеко-машинного взаимодействия нейронами головного мозга для интерфейса нейронной коммуникации [6]; создание математических моделей, численных методов и комплексов программ на базе систем с нейроинтерфейсами – устройств для обмена информацией между мозгом и внешним устройством [7]; интернет вещей [8, 9].

В данной статье, на основе имеющихся аппаратных составляющих на рынке, рассматривается возможность создания прототипа программного продукта для нейропилотирования и управления роботом в режиме «интерфейс мозг – компьютер» на основе извлечения и расшифровки устойчивого визуально вызванного потенциала (УВВП) системами возбуждения сетчатки глаза, электроэнцефалографии (ЭЭГ) и сверточных нейронных сетей (СНС).

Разработка такого программного комплекса позволит управлять роботом или беспилотным аппаратом с помощью УВВП, получаемого смарт-очками и нейрогарнитурой. Под УВВП понимается зрительно вызванные потенциалы устойчивого состояния — это сигналы, которые головной мозг генерирует в ответ на визуальную стимуляцию. Когда сетчатка глаза возбуждается вспышками частотой от 3.5 до 75 Гц, затылочная доля мозга генерирует электрическую активность с частотой мигания вспышки. Извлечение и расшифровка УВВП предлагается осуществлять с помощью ЭЭГ и СНС. В практическом смысле ожидаемый результат может быть получен с помощью программного комплекса для смарт-очков типа EPSON smart glasses moverio bt-350 и электроэнцефалографа-анализатора типа ЭЭГА-21/26-«Энцефалан-131-03» или беспроводной мобильной системы регистрации ЭЭГ человека с сухими безгелевыми электродами, например, Нейроплэй-8С (нейрогарнитурой).

### Подход к разработке неинвазивного нейроинтерфейса управления роботом

С помощью данного программного комплекса оператор управляет роботом или беспилотным аппаратом, фокусирует свое внимание на соответствующем раздражителе, отображаемого в смарт-очках. Оператор может выбрать одно из пяти действий, доступных в управлении. Например, это может соответствовать шести раздражителям, которые мерцают с разными частотами:

- вперёд (10 Гц);

- назад (15 Гц);
- влево (20 Гц);
- вправо (25 Гц);
- вниз (30 Гц);
- вверх (35 Гц).

В качестве исходных данных выступают ЭЭГ-сигналы, а назначенные задачи — метками для системы глубокого обучения с учителем. Предполагается использование 8-электродного ЭЭГ-шлема, который соответствует 8-ми каналам входных данных. Выходные данные, временные сигналы, конвертируются в частотный спектр с помощью быстрого преобразования Фурье.

Модель классификатора УВВП на основе сверточной нейронной сети может быть построена по технологии CNN-1 [10]. Такая модель содержит два скрытых уровня с размерами ядер 1 на 8 и 11 на 1 соответственно. С ними идёт выходной слой с шестью частями, что соответствует шести возможным действиям для управления роботом или беспилотным аппаратом. Чтобы построить классификатор глубокого обучения с учителем, необходимо предварительно собрать учебные и тестовые данные, и произвести десятикратную кросс-валидацию с учебными данными (не менее 13500 экземпляров) и тестовыми данными (не менее 1500 экземпляров).

Также это могут быть использованы другие нейронные сети и методы обработки сигнала, например:

- архитектура CNN-1 с дополнительным полносвязным слоем и с тремя частями перед выходным слоем (CNN-2);
- нейронная сеть прямого распространения: простая трёхслойная полносвязная нейросеть с прямой связью;
- канонический корреляционный анализ (ККА) для классификации УВВП;
- мультивариантная индексная синхронизация (МИС) с оцениванием синхронизации между двумя сигналами в виде коэффициента для расшифровки частоты раздражителя;
- канонический анализ корреляции с методом  $k$ -ближайших соседей (ККА).

На рисунке 1 представлена схема реализации программного продукта для нейропилотирования с потоками данных на основе имеющихся на рынке аппаратных решений.

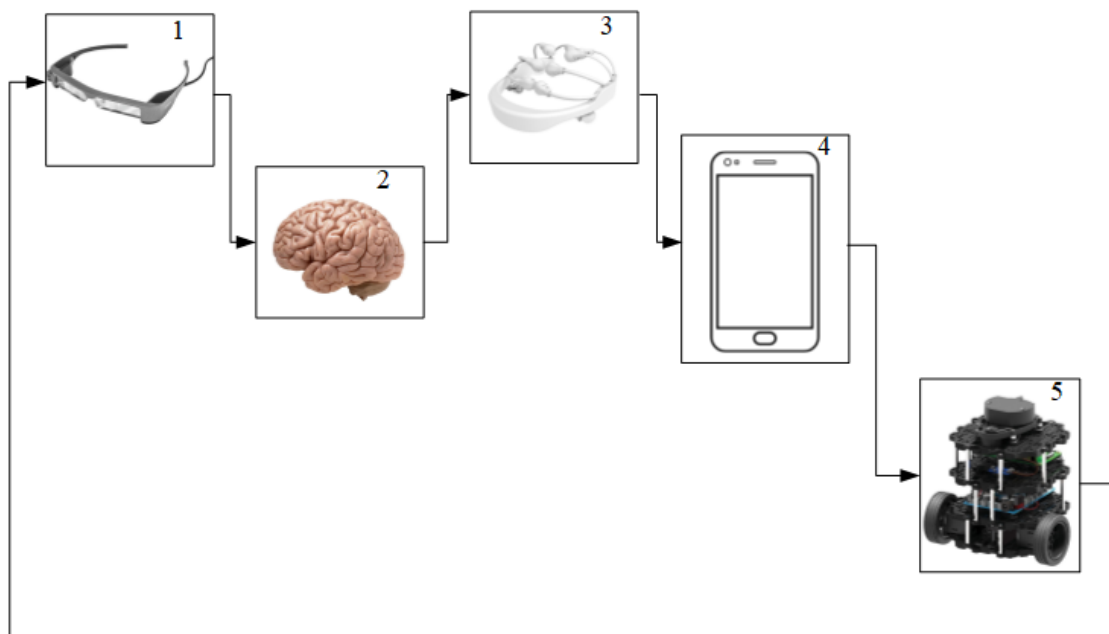


Рис. 1. Предлагаемая схема нейроинтерфейса управления роботом

Представленная на рисунке 1 схема включает в себя следующие блоки:

1. smart очки или smart шлем выступают в качестве зрительного возбудителя УВВП;
2. мозг человека для выработки ЭЭГ сигналов в затылочной области;
3. нейрогарнитура для снятия ЭЭГ сигналов;
4. система сбора и обработки ЭЭГ сигналов, генерации управляющих сигналов роботом на основе принятия решения с помощью СНС;

5. робот.

В первичном эксперименте потребовалось выбрать 8 электродов на ЭЭГ-шлеме, которые соответствуют 8-ми каналам входных данных (рис. 2). Также это позволило ускорить преобразование Фурье, чтобы конвертировать временные сигналы в частотные. В результате получилось 120 сэмплов входных данных, т.е. сигнал размерностью 120 на 8 [11].

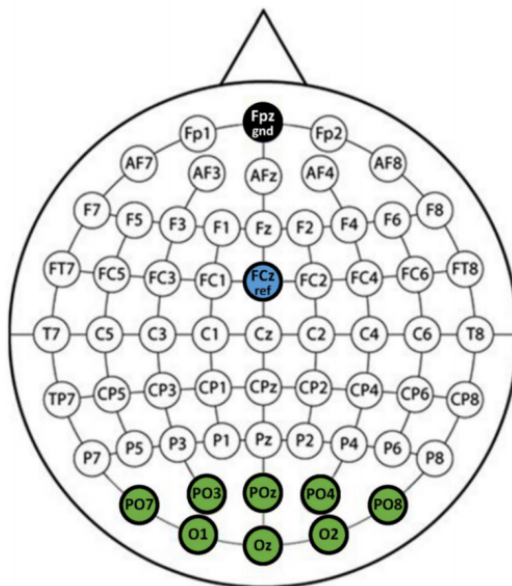


Рис. 2. ЭЭГ-каналы, 8 каналов для получения УВВП с затылочной части головы человека

Проблема технологии CNN-1 заключается в том, что архитектура таких СНС использует двумерные ядра (2D), что очень затратно для систем с ограниченными возможностями. Поэтому для таких целей на базе Института проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук была разработана оригинальная одномерная СНС, основанная на принципе работы внутреннего уха человека (рис. 3) [12, 13]. Фундаментальное предположение заключалось в том, что эмоциональная характеристика, содержащаяся в речевом сигнале, также сохраняется в усредненном векторе частотных характеристик и ее производных, например, такой производной как мелкепстральные коэффициенты акустического сигнала (MFCC) [13].

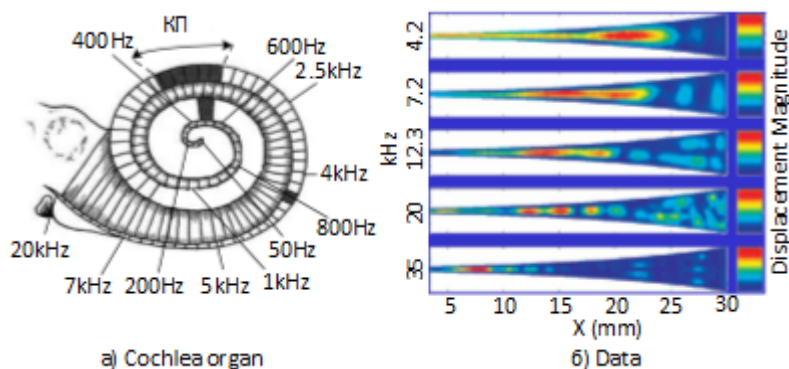


Рис. 3. Улитка внутреннего уха человека: а) частотное распределение акустической волны по принципу частотного маскирования (КП - критическая полоса); б) данные для обучения - средняя магнитуда по длине базиллярной мембраны (усредненный вектор частотных характеристик)

На основе данного подхода разработана модель СНС со следующими техническими параметрами (рис. 4): входной слой - вектор - 64; первый сверточный слой (layer 1) - 128 same фильтров (SF), размер ядра (kernel size - KS) - 4, шаг (strides) - 1, padding - same, активация функцией ReLu; второй сверточный слой (layer 2) - 128 SF, KS 4, strides - 1, padding - same, нормализация (Batch Normalization), активация ReLu, коэффициент регуляризации (Dropout) - 0.25, операция объединения (Max pooling) - 2; layer 3, 64 SF, KS 4, strides - 1, padding - same, ReLu; Layer 4, 64 SF, KS 4, strides - 1, padding - same, ReLu; Layer 5, 64 SF, KS 4, strides - 1, padding - same, ReLu;

Layer 6, 64 SF, KS 4, strides - 1, padding - same, Batch Normalization, ReLu, Dropout – 0.25, Max pooling - 2; Layer 7, 32 SF, KS 2, strides - 1, padding - same, ReLu; Layer 8, 32 SF, KS 4, strides - 1, padding - same, ReLu; Layer 9 (полносвязный слой), flatten - 512 нейронов; выходной полносвязный слой (Dense) - 10 нейронов, активация Softmax.

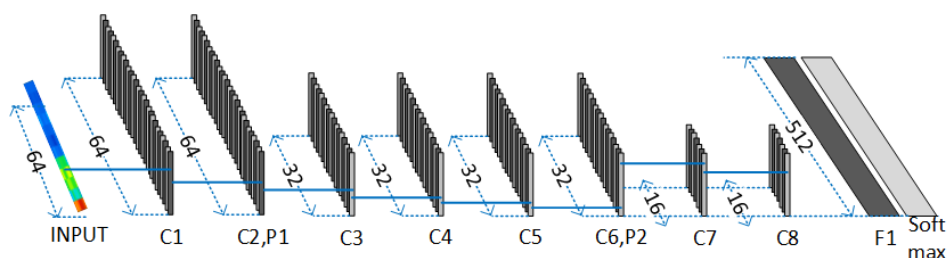


Рис. 4. Диаграмма предлагаемой СНС 1D-Cochlea-organ-cnn, разработанной Институтом проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук

Представленная на рисунке 4 диаграмма разработанной СНС состоит в объединении 11-ти функциональных уровней (так называемых слоев) с целью преобразования передаваемых через них сигналов ЭЭГ [9]. Каждый юнит в слое получает входные данные от набора юнитов, расположенных по соседству на предыдущем слое. Каждый выход сверточного слоя поддерживается функцией активации слоя. Выходной результат операции свертки, рассчитанный каждым ядром, собирается в матрицы, которые называются картами признаков и представляют собой фактические выходные данные сверточных слоев. Последний уровень СНС – это уровень, который осуществляет целевой прогноз нейронной сети. В отличие от предыдущих сверточных слоев он состоит из полностью связанных нейронов (полносвязный слой), так что каждый из них принимает данные сразу от всего предыдущего слоя. Задача поиска оптимальных значений синаптических коэффициентов каждого ядра и нейронов полносвязного слоя (слоев) в режиме глубокого обучения СНС сводится к задаче оптимизации. Известно, что та или иная архитектура СНС (в том числе и для задачи классификации биологических сигналов) оказывает влияние на решение такого класса задач.

Работа комплекса должна осуществляться в двух режимах: режим обучения и режим управления роботом. В режиме обучения комплекс программ должен иметь возможность сбора спектрограмм ЭЭГ-сигналов (обучающих выборок) для дальнейшего глубокого обучения. В комплекс программ, обеспечивающий нейроинтерфейс предлагается включить следующие модули.

1. Программный модуль под известные платформы типа OS Android (на базе Flutter):

1.1. Программный модуль приема и обработки ЭЭГ-сигналов, поступающих от нейрогарнитуры:

1.1.1. Прием ЭЭГ-сигналов от нейрогарнитуры.

1.1.2. Очистка полученных сигналов.

1.1.3. Получение спектрограмм с возможностью выставления временных интервалов.

1.1.4. Функция сохранения спектрограмм в отдельные файлы для дальнейшего получения обучающих выборок и возможностью передачи их на твердый носитель персонального компьютера.

1.2. Программный модуль генерации управляющих сигналов для управления роботом.

2. Разработка СНС под OS Android (на базе Flutter):

2.1. Расшифровка и интерпретация сигналов головного мозга.

2.2. Модель оригинальной СНС, способной осуществлять классификацию УВВП.

2.3. Интеграция разработанной модели СНС в КП.

3. Разработка документации разработчика и пользователя КП.

**Вывод.** Предложен подход для управления и решения задачи управления роботом с использованием технологии нейроинтерфейсов, описана общая схема и принцип работы основной идеи неинвазивного нейроинтерфейсного управления роботом с использованием оригинальной СНС. Предложена структура программного комплекса.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-01156.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дробот В. Перспективы развития киберфизических производственных систем // Control Engineering Россия. 2018. № 5(77). С. 30-31.
2. Keerthi C.K., Jabbar M.A., Seetharamulu B. Cyber Physical Systems (CPS): Security Issues, Challenges and Solutions // 2017 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (IC-CIC). 2017. P. 1-4.
3. Пряничников В.Е., Арыскин А.А., Ксензенко А.Я., Петраков М.С., Игнатьев В.А., Хелемендик Р.В. Построение сервисного автономного мобильного робота на основе управления, использующего логический анализ реализуемости операций // Труды XX Всероссийской научной конференции (17-22 сентября 2018 г., г. Новороссийск). М.: ИПМ им. М.В.Келдыша, 2018. С. 428-437.
4. Galin R., Meshcheryakov R. Human-Robot Interaction Efficiency and Human-Robot Collaboration // Studies in Systems, Decision and Control. 2020. Vol. 272. P. 55-63.
5. Galin R., Meshcheryakov R. Collaborative robots: development of robotic perception system, safety issues and integration of AI to imitate human behavior // Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings". 2020. Vol. 187. P. 175-185.
6. Kharchenko S., Meshcheryakov R., Turovsky Y., Volf D. Implementation of Robot-Human Control Bio-Interface When Highlighting Visual Evoked Potentials Based on Multivariate Synchronization Index // ER(ZR)-2020: 15th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings". September 2020. Vol. 187.
7. Туровский Я.А., Харченко С.С., Мещеряков Р.В., Исхакова А.О., Исхаков А.Ю. Алгоритмическое обеспечение интерфейса управления робот-человек при выделении зрительных вызванных потенциалов на основе многомерного индекса синхронизации // Известия ЮФУ. Технические науки. 2020. № 1. С. 66-88.
8. Щербинина М.Ю., Стефанова Н.А. Концепция интернет вещей // Креативная экономика. 2016. Т. 10. No. 11. С. 1323-1336.
9. Fatih D. A. Bio-inspired Filter Banks for SSVEP-based Brain-computer Interfaces // 2016 IEEE International Conference on Biomedical and Health Informatics (BHI). February 2016. P. 144-147.
10. Kwak N.-S., Muller K.-R., Lee S.-W. A convolutional neural network for steady state visual evoked potential classification under ambulatory environment // PLoS ONE. February 2017. Vol. 12(2). P. 1-20.
11. Middendorf M., McMillan G., Calhoun G., Jones K. Brain-Computer Interfaces Based on the Steady-State Visual-Evoked Response // IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering. June 2000. Vol. 8. No. 2. P. 211-214.
12. Haq S., Jackson P.J. Multimodal emotion recognition // Machine audition: principles, algorithms and systems. 2010. P. 398-423.
13. Han K., Yu D., Tashev I. Speech Emotion Recognition Using Deep Neural Network and Extreme Learning Machine // Interspeech. September 2014. P. 223-227

**Исхакова Анастасия Олеговна**

К.т.н., старший научный сотрудник

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова  
Российской академии наук

117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65

ORCID 0000-0001-8358-298X

Эл. почта: [shumskaya.ao@gmail.com](mailto:shumskaya.ao@gmail.com)**Вольф Данияр Александрович**

К.т.н., старший научный сотрудник

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова  
Российской академии наук

117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65

Тел.: +7-905-828-77-77

Эл. почта: [runsolar@mail.ru](mailto:runsolar@mail.ru)**Исхаков Андрей Юнусович**

К.т.н., старший научный сотрудник

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова  
Российской академии наук

117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65

ORCID 0000-0002-6603-265X

Эл. почта: [iskhakovandrey@gmail.com](mailto:iskhakovandrey@gmail.com)

A.O. ISKHAKOVA, D.A. VOLF, A.Y. ISKHAKOV

**NON-INVASIVE NEUROCOMPUTER INTERFACE FOR ROBOT CONTROL**

The work highlights the topical issue of automating human-robot interaction, including the control signal transfer using neurocomputer interface for information exchange between the brain and the electronic device. The paper proposes an original approach to control and solve the problem of controlling the robot using neurointerface technology. The authors describe the general scheme and working principle of the main idea of noninvasive neurointerface control of a robot using the original convolutional neural network. The task of developing a prototype software product for neuro-piloting and robot control in the "brain-computer interface" mode based on the extraction and interpretation of a steady visually evoked potential by the systems of retinal excitation, electroencephalography and convolutional neural networks is also studied. The principles of the original convolutional neural network operation and approach to the modern network de-

sign are described, a model of one-dimensional convolutional network based on the principles of human inner ear is presented, as well as a diagram of the developed convolutional neural network consisting of 11 functional levels (layers) for electroencephalogram signals transformation. The structure of the program complex is proposed.

**Keywords:** robot, neurointerface, steady visual evoked potential, electroencephalography, convolutional neural network, software package.

## REFERENCES

1. Drobot V. Prospects for the development of cyberphysical production systems. *Control Engineering Russia*. 2018. No. 5(77). P. 30-31 (in Russian).
2. Keerthi C.K., Jabbar M.A., Seetharamulu B. Cyber Physical Systems (CPS): Security Issues, Challenges and Solutions. *2017 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (IC-CIC)*. 2017. P. 1-4.
3. Pryanichnikov V.E., Ayskin A.A., Ksenzenko A.Ya., Petrakov M.S., Ignatiev V.A., Khelemendik R.V. Design of a service autonomous mobile robot, based on the control with logical analysis of operations feasibility. *Proceedings of the XX All-Russian Scientific Conference (September 17-22, 2018, Novorossiysk)*. Moscow: M.V. Keldysh Institute of Applied Mechanics. 2018. P. 428-437 (in Russian).
4. Galin R., Meshcheryakov R. Human-Robot Interaction Efficiency and Human-Robot Collaboration. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2020. Vol. 272. P. 55-63.
5. Galin R., Meshcheryakov R. Collaborative robots: development of robotic perception system, safety issues and integration of AI to imitate human behavior. *Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*. 2020. Vol. 187. P. 175-185.
6. Kharchenko S., Meshcheryakov R., Turovsky Y., Volf D. Implementation of Robot-Human Control Bio-Interface When Highlighting Visual Evoked Potentials Based on Multivariate Synchronization Index. ER(ZR)-2020: *15th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*. September 2020. Vol. 187.
7. Turovsky Y.A., Kharchenko S.S., Meshcheryakov R.V., Iskhakova A.O., Iskhakov A.Y. Algorithmic support of the interface of management of robot-human with the steady state visual evoked potentials based on the multivariate synchronization index. *Izvestiya SFedU. Engineering sciences*. 2020. No. 1. P. 66-88 (in Russian).
8. Shcherbinina M.Yu., Stefanova N.A. Concept of Internet of things. *Creative economy*. 2016. Vol. 10. No. 11. P. 1323-1336 (in Russian).
9. Fatih D.A. Bio-inspired Filter Banks for SSVEP-based Brain-computer Interfaces. *2016 IEEE International Conference on Biomedical and Health Informatics (BHI)*. February 2016. P. 144-147.
10. Kwak N.-S., Muller K.-R., Lee S.-W. A convolutional neural network for steady state visual evoked potential classification under ambulatory environment. *PLoS ONE*. February 2017. Vol. 12(2). P. 1-20.
11. Middendorf M., McMillan G., Calhoun G., Jones K. Brain-Computer Interfaces Based on the Steady-State Visual-Evoked Response. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*. June 2000. Vol. 8. No. 2. P. 211-214.
12. Haq S., Jackson P.J. Multimodal emotion recognition. *Machine audition: principles, algorithms and systems*. 2010. P. 398-423.
13. Han K., Yu D., Tashev I. Speech Emotion Recognition Using Deep Neural Network and Extreme Learning Machine. *Interspeech*. September 2014. P. 223-227

**Anastasia O. Iskhakova**

PhD, Senior Researcher

V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences,

65 Profsoyuznaya street, Moscow 117997, Russia

ORCID 0000-0001-8358-298X

E-mail: shumskaya.ao@gmail.com

**Daniyar A. Volf**

PhD, Senior Researcher

V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences,

65 Profsoyuznaya street, Moscow 117997, Russia

Phone: +7-905-828-77-77

E-mail: runsolar@mail.ru

**Andrey Y. Iskhakov**

PhD, Senior Researcher

V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences,

65 Profsoyuznaya street, Moscow 117997, Russia

ORCID 0000-0002-6603-265X

E-mail: iskhakovandrey@gmail.com