

РАЗРАБОТКА ПЕРЧАТКИ-КОНТРОЛЛЕРА С БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКОГО ПРИВОДА

Д. Л. Овчинников¹, А. Ю. Тычков², А. К. Алимуратов³, А. В. Агейкин⁴

^{1,2,3,4} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ dmitry_ovch@mail.ru, ² tychkov-a@mail.ru, ³ alansapfir@yandex.ru, ⁴ ageykinav@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В современных контроллерах виртуальной реальности система обратной связи остается недостаточно развитой и, как правило, ограничивается лишь вибрационными откликами. Эта проблема препятствует пользователю полностью погрузиться в виртуальные сцены, так как не обеспечивает адекватного понимания взаимодействия между человеком и объектами в виртуальном мире. *Материалы и методы.* Проведен анализ существующих решений для реализации системы биологической обратной связи в виртуальной реальности. На основе выявленных преимуществ и недостатков был выбран пневматический привод с электронным управлением. Определены необходимые датчики и исполнительные механизмы для корректной работы системы. Рассмотрены различные типы датчиков, а также их достоинства и недостатки. *Результаты.* В результате проведенного анализа были выбраны ключевые компоненты для реализации системы: воздушный компрессор, пневматические двухпозиционные клапаны и подобраны варианты их исполнения. Определен подходящий микроконтроллер с возможностями расширения функционала за счет встроенных модулей, а также выбран тип датчика для определения положения пальцев. *Выводы.* Предложенное техническое решение может найти широкое применение не только в игровой индустрии, но и в реабилитации пациентов с нарушениями моторных функций рук из-за травм, инсульта, заболеваний или старения.

Ключевые слова: виртуальная реальность, персональный компьютер, биологическая обратная связь, пневматика, микроконтроллер

Для цитирования: Овчинников Д. Л., Тычков А. Ю., Алимуратов А. К., Агейкин А. В. Разработка перчатки-контроллера с биологической обратной связью виртуальной реальности на основе электропневматического привода // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 1. С. 90–96. doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-11

DEVELOPMENT OF A GLOVE CONTROLLER WITH BIOFEEDBACK OF VIRTUAL REALITY BASED ON AN ELECTROPNEUMATIC DRIVE

D.L. Ovchinnikov¹, A.Yu. Tychkov², A.K. Alimuradov³, A.V. Ageikin⁴

^{1,2,3,4} Penza State University, Penza, Russia

¹ dmitry_ovch@mail.ru, ² tychkov-a@mail.ru, ³ alansapfir@yandex.ru, ⁴ ageykinav@yandex.ru

Abstract. *Background.* In modern virtual reality controllers, the feedback system remains underdeveloped and, as a rule, is limited only to vibration responses. This problem prevents the user from fully immersing himself in virtual scenes, as it does not provide an adequate understanding of the interaction between a person and objects in the virtual world. *Materials and methods.* The analysis of existing solutions for the implementation of a biofeedback system in virtual reality is carried out. Based on the identified advantages and disadvantages, an electronically controlled pneumatic actuator was selected. The necessary sensors and actuators have been identified for the correct operation of the system. Various types of sensors are considered, as well as their advantages and disadvantages. *Results.* As a result of the analysis, the key components for the implementation of the system were selected: an air compressor, pneumatic two-position valves and their variants were selected. A suitable microcontroller with the ability to expand functionality through built-in modules has been identified, and the type of sensor for determining the position of fingers has been selected. *Conclusions.* The proposed technical solution can find wide application not only in the gaming industry, but also in the rehabilitation of patients with impaired motor functions of the hands due to injuries, strokes, diseases or aging.

Keywords: virtual reality, personal computer, biofeedback, pneumatics, microcontroller

For citation: Ovchinnikov D.L., Tychkov A.Yu., Alimuradov A.K., Ageikin A.V. Development of a glove controller with biofeedback of virtual reality based on an electropneumatic drive. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(1):90–96. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-11

Введение

В современном мире технологии виртуальной реальности (VR) продолжают стремительно развиваться, открывая новые горизонты для исследований и разработок. Одним из ключевых аспектов, способствующих повышению эффективности и реалистичности VR-систем, является использование биологической обратной связи (БОС) [1] в контроллерах. БОС позволяет интегрировать физиологические данные пользователя в виртуальный мир, создавая более интуитивное и естественное взаимодействие с окружающей средой.

На сегодня большинство существующих контроллеров [2] для виртуальной реальности не обладают системой обратной связи (ОС) соответствующего уровня. Чаще всего ОС ограничивается лишь функцией вибрационного отклика, например, при взаимодействии с объектами в сцене виртуальной реальности [3].

Внедрение функции биологической обратной связи в контроллеры позволит пользователям более полно погрузиться в виртуальный мир. Примером такого контроллера может служить перчатка, оснащенная специализированным механизмом, который создает нагрузку при сжатии и разгибании кисти, контролирует усилие для каждого пальца и отслеживает их положение.

Анализ предметной области

Современные устройства для взаимодействия с виртуальной реальностью обеспечивают достаточно точное отслеживание положения кисти в пространстве [2, 4, 5]. Однако положение пальцев часто ограничивается двумя состояниями, которые соответствуют нажатию или отпусканью определенных кнопок на контроллере. Хотя многие контроллеры оснащены так называемыми «курками» – поворачиваемыми переключателями, работающими относительно одной оси, большинство из них не имеют системы ОС, такой как сопротивление при нажатии. Исключением является контроллер Sony DualSense [6], в котором реализована подобная система.

Существуют также прототипы контроллеров-перчаток с биологической обратной связью, такие как HaptX, SensGlove, Phantom [7] и др. (рис. 1). Основной проблемой известных устройств является их ограниченная распространенность: зачастую такие системы разрабатываются в единственном экземпляре или небольших сериях и имеют высокую стоимость конечного продукта.

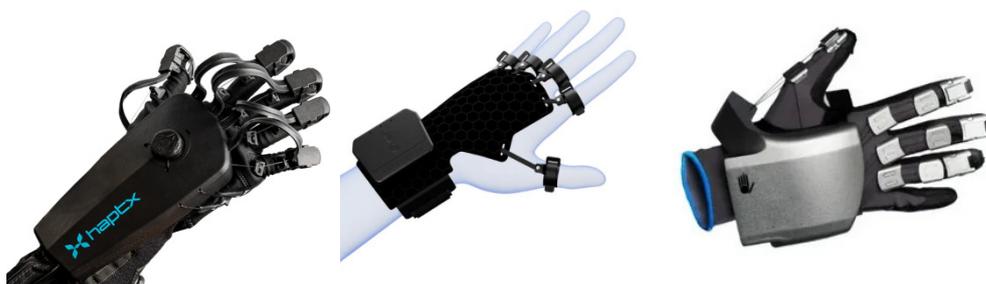


Рис. 1. Примеры контроллеров-перчаток для виртуальной реальности

Анализ известных технических решений контроллеров-перчаток для VR показал, что выделяются три основных вида системы реализации БОС [7]:

- электромеханический привод механизма создания усилия на сгибание и разгибание;
- пневматический привод с электронным управлением посредством микроконтроллера или компьютера;
- электростимуляцией нервов.

Все три технических исполнения имеют свои достоинства и недостатки. Электромеханический привод наиболее прост в реализации, однако имеет существенный недостаток в виде больших размеров и веса устройства. Для достижения необходимого усилия электродвигатель должен развивать соответствующий крутящий момент. Однако с уменьшением размеров

мотора его способность генерировать усилие на валу при определенном диапазоне оборотов снижается. Одним из решений этой проблемы является использование специально разработанного редуктора, основанного на системе блоков или зубчатых передач. Это позволяет минимизировать преимущества, получаемые от уменьшения геометрических размеров двигателя, и, как следствие, увеличивает общую массу конструкции. Большой вес устройства негативно сказывается на использовании, приводя к более быстрому возникновению усталости в конечностях. Кроме того, такой вариант реализации системы ОС требует значительных затрат энергии для приведения в движение электромоторов. Так, в разработанном прототипе контроллера-перчатки [3] средний ток потребления составлял 1,5–1,6 А, с частым пиковым током в 2 А при напряжении питания 5 В. Это способствует резкому уменьшению автономности системы.

Контроллер-перчатка с БОС, реализованной с помощью электростимуляции нервов, имеет значительно меньшие размеры по сравнению с предыдущим техническим решением. Однако у данного устройства имеются свои недостатки. Одним из основных является наличие медицинских противопоказаний: некоторые пользователи могут не иметь возможности использовать эту систему из-за непереносимости электрической стимуляции, что может привести к серьезным последствиям для здоровья.

Кроме того, существует проблема доставки электрических импульсов к нервам. Разное состояние кожи у различных людей (сухая, грубая, нежная и т.д.) приводит к изменению электрического сопротивления, что может препятствовать прохождению сигнала до нужного нерва при использовании сухих электродов. Одним из способов решения этой проблемы является применение специализированных электродов и проводящего геля. Однако полностью исключить влияние состояния кожного покрова у разных пользователей не представляется возможным. Также необходимо индивидуально подстраивать величину импульсов под каждого человека, так как слишком сильный электрический импульс может вызвать дискомфорт.

С другой стороны, реализация БОС с помощью пневматического привода с электронным управлением имеет ряд преимуществ. К ним относятся простота конструкции, создающей усилие на сжатие и разгибание, небольшой вес, который не нагружает конечность, а также легкость подстройки под индивидуальные параметры пользователя путем изменения давления в системе.

Однако существенным недостатком является необходимость поддержания рабочего давления в воздушном компрессоре и промежуточном баке. Тем не менее общая энергоэффективность данной системы значительно выше, чем у электромеханических аналогов. При рабочем давлении в системе, составляющем 1,5 бара, ток потребления при включенном компрессоре и электромагнитном клапане составил 1 А при напряжении питания 5 В в пиковом состоянии и 700–800 мА в состоянии покоя. Рассмотрим этот вариант исполнения устройства более подробно.

Предлагаемое решение

Для реализации предлагаемой системы контроллера-перчатки с БОС используются следующие основные узлы:

- воздушный компрессор;
- промежуточный бак хранения;
- пневматические клапаны с электронным управлением;
- ручные клапаны для возможного отключения привода на определенных пальцах;
- блок электроники для управления, реализованный на микроконтроллере;
- датчик положения кисти в пространстве (IMU сенсор);
- датчики положения пальцев – согнут или разогнут и насколько.

Рассмотрим данные узлы подробнее. В качестве воздушного компрессора можно использовать мини-помпы с напряжением питания 5 В. Они способны создавать давление в системе до 1,5 бар, при этом имея малые размеры, вес и возможность использовать в качестве источника питания стандартный powerbank для телефонов. Выход с насоса подключается к промежуточному баку. В резервуар устанавливается датчик давления для возможности отключения компрессора в целях экономии энергии, а также регулятор давления на выходе для возможности подстройки устройства под разных пользователей.

За счет использования реле давления и как следствие непостоянной работы компрессора общее электропотребление системы можно довести до одной-двух сотен миллиампер при включенных электромагнитных клапанах. В зависимости от варианта реализации пневматических

цилиндров на каждый палец необходим один клапан двойного действия – обратное движение осуществляется за счет пружины, а выброс воздуха осуществляется клапаном в атмосферу, либо два клапана при реализации обратного движения с помощью подачи давления с другой стороны цилиндра. Управление ими будет происходить с помощью микроконтроллера через силовые элементы – MOSFET-транзисторы.

Блок электроники возможно реализовать на нескольких микроконтроллерах – Atmega 328p, ESP8266, ESP32, STM32 [8, 9]. Наиболее выгодным является ESP32 за счет встроенного модуля Bluetooth и Wi-Fi, что позволит связать систему с персональным компьютером и с запущенной на нем сценой виртуальной реальности. Это повышает мобильность пользователя, использующего данное устройство, за счет отказа от проводного соединения [10].

Для отслеживания положения кисти в пространстве необходимо использовать IMU-сенсор – комбинированный датчик, включающий в себя гироскоп, акселерометр и магнитометр. Все это позволяет увеличить точность получаемых показателей. Для определения положения пальцев возможно использовать один из трех типов датчиков:

- резистивный (рис. 2,а);
- оптический (рис. 2,б);
- тензорезистивный (рис. 2,в).

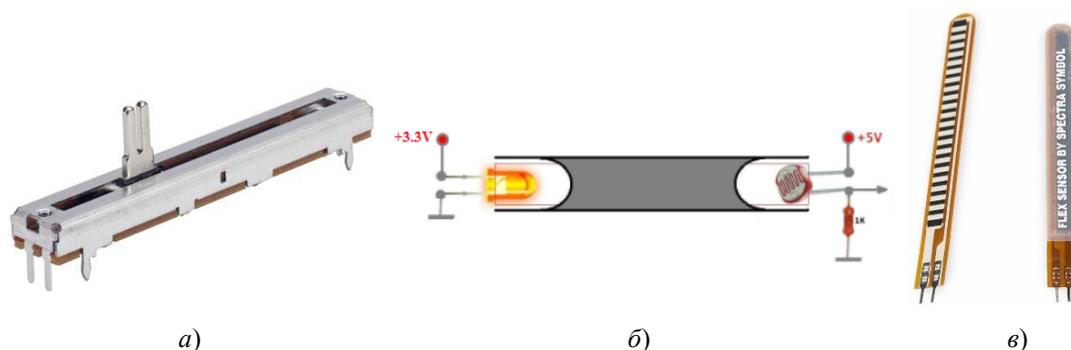


Рис. 2. Различные типы датчиков изгиба:
а – резистивный; б – оптический; в – тензорезистивный

В случае с резистивным датчиком [3, 11] используется переменный резистор линейного типа, соединенный с пальцем с помощью лески или нитки, а также пружина для возврата в нулевое положение. При сгибании или разгибании пальца ползунок перемещается, что приводит к изменению общего сопротивления в цепи «датчик – микроконтроллер». Эти изменения фиксируются в аналогово-цифровом преобразователе и используются для расчета необходимости открытия или закрытия электроклапана. Недостатком данного технического решения являются его размеры и относительно сложная конструкция, требующая дополнительных компонентов.

Оптический датчик [12] основан на фоторезисторе и постоянном источнике света, размещенных в противоположных концах гибкого светопроводящего стержня. При изменении формы пальца интенсивность излучения от источника света на фотосенсоре будет варьироваться, что позволяет определить степень сгибания или разгибания. Преимуществами данного решения являются компактные размеры и простота реализации. Однако со временем из-за постоянной деформации датчик может потерять чувствительность, вплоть до полной невозможности его дальнейшего использования. Кроме того, потребуется периодическая настройка конечных значений.

Тензорезистивный датчик отличается еще меньшими геометрическими размерами и простой схемой подключения [13]. Как и оптический датчик, он благодаря своей гибкости позволяет уменьшить общие габариты изделия и его вес. Однако, как и предыдущие варианты, он подвержен износу в процессе эксплуатации. Несмотря на свои недостатки, тензорезистивный датчик является наиболее выгодным в использовании благодаря своей простой конструкции [14].

Заключение

Таким образом, для создания эффективной системы БОС контроллера-перчатки с пневматическим приводом необходимы следующие ключевые компоненты: воздушный компрессор,

промежуточный бак, пневматические и ручные клапаны, блок электроники на основе микроконтроллера ESP32, инерциальный измерительный блок (IMU) и тензорезистивные датчики для определения положения пальцев. Данные элементы играют важную роль в обеспечении точного и надежного управления системой.

Использование воздушного компрессора с напряжением питания в 5 В позволяет подключать систему к повербанку. Применение реле давления для отключения электромотора минимизирует энергопотребление и обеспечивает высокую мобильность устройства. Микроконтроллер ESP32 с встроенными модулями Bluetooth и Wi-Fi повышает удобство использования и расширяет возможности взаимодействия с персональным компьютером и виртуальной реальностью.

Комбинируемое использование всех этих компонентов позволяет создать эффективную и точную систему БОС, способную адаптироваться к различным потребностям и условиям эксплуатации. Предложенное техническое решение может найти широкое применение не только в игровой индустрии, но и в реабилитации пациентов с нарушениями моторных функций рук из-за травм, инсульта, заболеваний или старения.

Список литературы

1. Истомина Б. А., Истомина Т. В. Описание биологической обратной связи с использованием элементов теории автоматического управления // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2015. № 5 (27). С. 234–240.
2. Pat. WO/2020/013039 Japan. Information processing device and control method of controller device / Bailey T., Yamada E. № PCT/JP2019/026348 ; intenat. filling date 02.07.2019 ; publ. 16.01.2020. 66 p.
3. Новиков А. А. Новая VR-перчатка работает напрямую с нервной системой, минуя кожу. URL: <https://4pda.to/2024/02/04/423710> (дата обращения: 28.10.2024).
4. Либер Ю. С., Гюльмалиева С. Э., Тараканова Д. Ю. Тензометрические датчики. Виды и принципы работы // Коррекционно-педагогическое образование. 2021. № 5. С. 153–164.
5. Тычков А. Ю., Волкова К. Ю., Киселева Д. В., Родионова Е. А. Обзор систем виртуальной реальности // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2020. № 2. С. 3–13.
6. Liu X., Zhang J., Hou G., Wang Z. Virtual Reality and Its Application in Military // Conference Series Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 3. P. 32–41.
7. Документация на микроконтроллер ESP32. Espressif Systems, 2024. 77 с.
8. Ермаков Д. А., Петрунина Е. В., Пшеничный А. Е. Биотехническая система реабилитации двигательной активности конечностей с биологической обратной связью посредством модуля виртуальной реальности // Биотехнология и биомедицинская инженерия : сб. науч. тр. по материалам XIII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвящ. 88-летию Курского государственного медицинского университета. Курск, 2023. С. 113–116.
9. Овчинников Д. Л., Тычков А. Ю., Симакова О. С. [и др.]. Разработка контроллера-перчатки для реабилитации моторики верхних конечностей с использованием виртуальной реальности // Биомедицинская радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 5. С. 34–40.
10. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022666983. Программа для идентификации рук и захвата предметов в среде виртуальной реальности / Чернышов Д. С., Тычков А. Ю., Золотарев Р. В., Сотников А. М., Маркелов С. О., Овчинников Д. Л. № 2022666033 ; заявл. 29.08.2022 ; опубл. 13.09.2022. 10 с.
11. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022668843. Программа для идентификации аватара в среде виртуальной реальности / Чернышов Д. С., Тычков А. Ю., Золотарев Р. В., Сотников А. М., Маркелов С. О., Овчинников Д. Л. № 2022668224 ; заявл. 03.10.2022 ; опубл. 12.10.2022. 11 с.
12. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022661915. Программа контролируемого нагрева тепла для микроконтроллера Atmega328P / Тычков А. Ю., Овчинников Д. Л., Сашина А. Д., Чернышов Д. С., Майданов Н. А., Лебедев И. А. № 2022660489 ; заявл. 08.06.2022 ; опубл. 28.06.2022.
13. Васин С. В., Иванов О. В. Разработка схемы управления и опроса волоконно-оптического датчика изгиба на основе волокна с двойной оболочкой // Автоматизация процессов управления. 2017. № 1. С. 101–107.
14. Пат. RU2079808C1 Российская Федерация МПК G 01 В 7/00. Резистивный датчик положения / Федосов А. А. № 5022105/28 ; заявл. 13.01.1992 ; опубл. 20.05.1997.

References

1. Istomin B.A., Istomina T.V. Description of biofeedback using elements of the theory of automatic control. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus = XXI century: results of the past and problems of the present plus*. 2015;(5):234–240. (In Russ.)

2. Patent WO/2020/013039 Japan. *Information processing device and control method of controller device*. Bailey T., Yamada E. № PCT/JP2019/026348; intenat. filling date 02.07.2019; publ. 16.01.2020. 66 p.
3. Novikov A.A. *Novaya VR-perchatka rabotaet napryamuyu s nervnoy sistemoy, minuya kozhu = The new VR glove works directly with the nervous system, bypassing the skin*. (In Russ.). Available at: <https://4pda.to/2024/02/04/423710> (accessed 28.10.2024).
4. Liber Yu.S., Gyul'malieva S.E., Tarakanova D.Yu. Strain gauges. Types and principles of work. *Korreksionno-pedagogicheskoe obrazovanie = Correctional and pedagogical education*. 2021;(5): 153–164. (In Russ.)
5. Tychkov A.Yu., Volkova K.Yu., Kiseleva D.V., Rodionova E.A. Review of virtual reality systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of higher educational institutions. The Volga region. Technical sciences*. 2020;(2):3–13. (In Russ.)
6. Liu X., Zhang J., Hou G., Wang Z. Virtual Reality and Its Application in Military. *Conference Series Earth and Environmental Science*. 2018;3:32–41.
7. *Dokumentatsiya na mikrokontroller ESP32*. Espressif Systems, 2024:77.
8. Ermakov D.A., Petrunina E.V., Pshenichnyy A.E. A biotechnical system for rehabilitation of limb motor activity with biofeedback through a virtual reality module. *Biotehnologiya i biomeditsinskaya inzheneriya: sb. nauch. tr. po materialam KhIII Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem, posvyashch. 88-letiyu Kurskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta = Biotechnology and biomedical engineering : collection of scientific papers based on the materials of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference with international conferences. participation, dedication. 88th anniversary of Kursk State Medical University*. Kursk, 2023:113–116. (In Russ.)
9. Ovchinnikov D.L., Tychkov A.Yu., Simakova O.S. et al. Development of a glove controller for upper limb motor rehabilitation using virtual reality. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical radio electronics*. 2024;27(5):34–40. (In Russ.)
10. Registration certificate for EVM RU 2022666983. *Programma dlya identifikatsii ruk i zakhvata predmetov v srede virtual'noy real'nosti = A program for identifying hands and grabbing objects in a virtual reality environment*. Chernyshov D.S., Tychkov A.Yu., Zolotarev R.V., Sotnikov A.M., Markelov S.O., Ovchinnikov D.L. № 2022666033; appl. 29.08.2022; publ. 13.09.2022. 10 p. (In Russ.)
11. Registration certificate for EVM RU 2022668843. *Programma dlya identifikatsii avatara v srede virtual'noy real'nosti = A program for identifying an avatar in a virtual reality environment*. Chernyshov D.S., Tychkov A.Yu., Zolotarev R.V., Sotnikov A.M., Markelov S.O., Ovchinnikov D.L. № 2022668224; appl. 03.10.2022; publ. 12.10.2022. 11 p. (In Russ.)
12. Registration certificate for EVM RU 2022661915. *Programma kontroliruemogo nagreva tepla dlya mikrokontrollera Atmega328P = Controlled heat heating program for the ATmega328P microcontroller*. Tychkov A.Yu., Ovchinnikov D.L., Sashina A.D., Chernyshov D.S., Maydanov N.A., Lebedev I.A. № 2022660489; appl. 08.06.2022; publ. 28.06.2022. (In Russ.)
13. Vasin S.V., Ivanov O.V. Development of a control scheme and polling of a fiber-optic bending sensor based on a fiber with a double shell. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya = Automation of control processes*. 2017;(1):101–107. (In Russ.)
14. Patent RU2079808C1 Russian Federation MPK G 01 B 7/00. *Rezistivnyy datchik polozheniya = Resistive position sensor*. Fedosov A.A. № 5022105/28; appl. 13.01.1992; publ. 20.05.1997. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Леонидович Овчинников

инженер кафедры радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: dmitry_ovch@mail.ru

Dmitry L. Ovchinnikov

Engineer of the sub-department
of radio engineering and radio electronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Юрьевич Тычков

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tychkov-a@mail.ru

Aleksandr Yu. Tychkov

Doctor of technical sciences, associate professor,
head of the sub-department of radio engineering
and radio electronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Алан Казанферович Алимуратов

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alansapfir@yandex.ru

Alan K. Alimuradov

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department
of radio engineering and radio electronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Алексей Викторович Агейкин

кандидат медицинских наук,
доцент кафедры микробиологии,
эпидемиологии и инфекционных болезней,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ageykinav@yandex.ru

Aleksey V. Ageikin

Candidate of medical sciences, associate professor
of the sub-department of microbiology,
epidemiology and infectious diseases,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 20.11.2024

Поступила после рецензирования/Revised 15.12.2024

Принята к публикации/Accepted 12.01.2025