

## ОПТИЧЕСКИЙ КАНАЛ СВЯЗИ НА МИКРОКОНТРОЛЛЕРАХ OPTICAL COMMUNICATION CHANNEL ON MICROCONTROLLERS

**Д. А. ЕРМОЛАЕВ<sup>1</sup>, О. В. ТИХОНОВА<sup>1</sup>, А. А. БОНДАРЬ<sup>1</sup>, М. Д. ГЛОТОВ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), Москва, Россия

<sup>2</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), Москва, Россия

**D. A. Ermolaev<sup>1</sup>, O. V. Tikhonova<sup>1</sup>, A. A. Bondar<sup>1</sup>, M. D. Glotov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA), Moscow, Russia

<sup>2</sup> P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences (LPI), Moscow, Russia

**Аннотация.** Предлагается концепция оптического канала передачи данных между двумя устройствами, описываются первые эксперименты по его реализации и их результаты. Работа проводится в рамках подготовки к созданию оптического маршрутизатора, способного обеспечить устойчивую беспроводную связь для стационарных, а в дальнейшем и для мобильных устройств, исключая проблемы радиосвязи (перегрузка каналов, воздействие помех). Проведены эксперименты с различными схемами подключения фотоприёмников, программной реализацией передачи данных и микроконтроллерами бюджетного сегмента. Наиболее эффективным решением в рамках проведенных исследований оказалось применение пары оптического излучателя и приемника, использующих UART-интерфейс.

**Ключевые слова:** оптический канал связи, микроконтроллеры, инфракрасный диапазон, UART-интерфейс, фотоприёмник, оптический излучатель, беспроводная связь, оптический маршрутизатор, ESP32, ATmega328, фототранзистор, компаратор, скорость передачи данных.

**Для цитирования:** Оптический канал связи на микроконтроллерах / Д. А. Ермолаев [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2026. Т. 210. № 1. С. 36–40.

**Annotation.** The concept of an optical data transmission channel between two devices is proposed, the first experiments on its implementation and their results are described. The work is being carried out in preparation for the creation of an optical router capable of providing stable wireless communication for stationary and, later, for mobile devices, eliminating radio communication problems (channel overload, interference). Experiments have been conducted with various schemes for connecting photodetectors, software implementation of data transmission and microcontrollers of the budget segment. The most effective solution in the framework of the conducted research turned out to be the use of a pair of optical emitter and receiver using a UART interface.

**Key words:** optical communication channel, microcontrollers, infrared range, UART interface, photoreceiver, optical emitter, wireless communication, optical router, ESP32, ATmega328, phototransistor, comparator, data transfer rate.

**For citation:** Optical communication channel on microcontrollers / D. A. Ermolaev [et. al] // Electromechanical matters. VNIEM studies. 2026. Vol. 210. № 1. Pp. 36–40.

### Введение

В условиях роста плотности беспроводных сетей неизбежна интерференция сигналов, передающихся на одной частоте, которая приводит к ухудшению связи. Чем больше количество устройств, тем выше загруженность сети и тем выше вероятность искажения передаваемых данных [1].

Для решения данной проблемы разработано множество методов, направленных на оптимизацию использования радиоканалов. При частотном разделении выбирается наименее загруженный канал. При временном разделении каждому участнику сети отводится определенный временной интервал для передачи данных.

Такие методы имеют ряд ограничений. При большом количестве подключенных устройств могут быть загружены все каналы. При временном разделении снижается скорость передачи данных, поскольку цикл передачи ограничен фиксированными временными интервалами. Падение скорости особенно заметно при большом числе устройств в сети, работающих в одном диапазоне.

В статье рассматривается иной подход к решению проблемы – отказ от радиоканалов в пользу альтернативных сред передачи, в частности – инфракрасный (ИК) диапазон.

Использование ИК-диапазона для передачи данных не является новым. До широкого распространения таких технологий как *Bluetooth* и *Wi-Fi* в мобильных устройствах использовался ИК-порт. Однако для обмена данными по ИК-порту требовалось близкое расположение устройств и точное совмещение ИК-передатчика и приемника [2].

Следующим шагом в развитии систем передачи данных по оптическим каналам связи стало создание аналога *Wi-Fi* – *Li-Fi* (*LightFidelity*). При использовании излучения видимого спектра возможно совмещение передающего устройства и осветительной системы [2, 3]. К недостаткам *Li-Fi* можно отнести чувствительность к уровню внешнего освещения – яркий дневной свет является источником помех для подобных систем [4, 5, 6].

Использование ИК-диапазона частично решает проблему влияния внешнего освещения (при ис-

пользовании соответствующих фильтров), а также позволяет вести обмен данными в условиях радиомолчания [4, 6, 7, 8].

В данной работе описываются эксперименты по созданию оптической линии, обеспечивающей связь между двумя устройствами, при помощи широко распространенных и недорогих аппаратных составляющих. Исследования, приводимые в работе, являются начальным этапом проекта по разработке оптической системы беспроводной связи, которая, в отличие от систем, описанных выше, способна осуществлять передачу данных не только в пределах одного помещения, но и на расстояниях до нескольких сотен метров. Такие системы смогут обеспечить стабильную связь для устройств с фиксированным положением и разгрузить диапазоны 2,4 и 5 ГГц. Беспроводные оптические линии связи могут найти применение в организации цифровой связи там, где осуществление проводной или радиосвязи затруднено.

Основная задача текущего этапа – проведение серии экспериментов с различными схемами подключения оптических компонентов и программной обработкой сигналов, направленных на достижение максимально возможной скорости передачи данных. Это необходимо для последующей разработки оборудования с полноценной логикой маршрутизации, управления подключениями и синхронизации.

### Варианты организации оптической линии связи

Первые исследования проводились с использованием передатчика и приёмника в ИК-диапазоне, поскольку при использовании оптических сигналов видимого спектра необходимо учитывать непредсказуемые изменения внешней засветки, что значительно усложняет эксперименты.

В качестве аппаратной составляющей, реализующей протоколы приёма и передачи, были использованы микроконтроллеры ESP32 и ATmega328 – простые и доступные устройства с открытой средой программирования. Все схемы собирались вручную на макетных платах с использованием стандартных компонентов.

Во всех экспериментах данного этапа расстояние между ИК-светодиодом и фототранзистором на передающей и приёмной сторонах составляло 20 мм. Устройства располагались строго друг напротив друга, без линз и направляющих – чтобы оценить базовую надёжность и скорость передачи в простейших условиях.

В качестве критерия сравнения исследуемых схем использовалась максимальная скорость передачи данных, при которой обеспечивалась устойчивая связь (передача данных без потерь). Передатчик отправлял фиксированный тестовый пакет данных, содержащий известную последовательность битов. Приёмник сравнивал полученный пакет с эталонным, и, в случае полного совпадения всех битов, считалось, что передача прошла успешно, и можно переходить на более высокую скорость. Если же при сравнении обнаруживалось расхождение хотя бы одного бита, результат считался неудачным, и достигнутая скорость фиксировалась как предельная для данного варианта схемы.

Такой подход позволил объективно оценить влияние аппаратной реализации и схемотехнических решений на надёжность и скорость передачи.

**Вариант 1: фототранзистор и пользовательский протокол.** В первом варианте рассматривалась схема с использованием максимально простой приемной аппаратной части, состоящей из фототранзистора, подключённого через делитель напряжения к аналоговому входу микроконтроллера (рис. 1). Основная обработка сигнала реализовывалась программой, загруженной в микроконтроллер (ESP32). Выбор микроконтроллера был обусловлен большей разрядностью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) по сравнению с более дешевым и простым микроконтроллером ATmega328. Ниже приведен порядок передачи и приема данных, а также схема передающего и приемного устройства.

Передатчик отправляет данные при помощи ИК-светодиода HL1 (BL-L513IRCA), подключённого через токоограничивающий резистор R2 к цифровому выходу. Приёмник получает сигнал с фототранзистора, подключённого через делитель напряжения (резистор R1 и ИК-фототранзистор VT1 (L-53P3C)) к аналоговому входу. Передача данных осуществлялась 9-битными пакетами (1 бит стартовый + 8 битов информационных). Ограничением скорости передачи данных стала скорость преобразования АЦП и программной обработки. Максимальная достигнутая скорость передачи данных составила 100 бит/с.

**Вариант 2: UART и транзистор.** Во втором варианте была реализована схема с использованием цифрового интерфейса *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* – UART и дополнительного ключевого каскада на биполярном транзисторе VT1 (МП42Б) (рис. 2). На передающей стороне ИК-светодиод HL1 (BL-513IRCA) подключался к выводу TX микроконтроллера ESP32 через токо-

ограничивающий резистор R4. На приёмной стороне ИК-фототранзистор VT2 (L-53P3C) управляет состоянием базы биполярного транзистора VT1 через резистор R3, который ограничивал ток базы, и в зависимости от уровня освещённости, замыкал или размыкал цепь, формируя логический уровень на входе RX второго микроконтроллера. Резисторы R1 и R2 задают режим работы транзистора.

Применение биполярного транзистора VT1 позволило усилить слабый сигнал с фототранзистора VT2 и ускорить переключение между логическими уровнями. Вследствие чего максимально достигнутая скорость связи составила 20 Кбит/с. Также это позволило повысить стабильность передачи и упростить программную часть. К недостаткам данного решения можно отнести необходимость подбора требуемого номинала резистора R1 в зависимости от расстояния между приёмником и передатчиком.

**Вариант 3: UART и компаратор.** В третьем варианте использовалась схема с внешним компаратором DD1 LM386, который преобразовывал аналоговый сигнал с фототранзистора в цифровой (рис. 3). Выход компаратора подключался к входу RX микроконтроллера ESP32, а передача осуществлялась, как и ранее – через выход TX, ИК-светодиод HL1 (BL-L513IRCA) и токоограничивающий резистор R2.

Для настройки уровня срабатывания компаратора использовался переменный резистор R4, подающий опорное напряжение на неинвертирующий вход. Значение опорного напряжения подбиралось равным среднему значению между уров-

нем сигнала с фототранзистора VT1 (L-53P3C) в тёмном состоянии и в освещённом. Это обеспечивало устойчивое распознавание оптических импульсов. На инвертирующий вход компаратора подавался сигнал с ИК-фототранзистора через ограничительный резистор R1. Подтягивающий резистор R3 необходим для правильной работы компаратора. Новая схема позволила точнее определить границу переключения сигнала, обеспечив лучшую помехоустойчивость, и повысить скорость переключения. Благодаря этому удалось достичь скорости передачи до 150 Кбит/с, что делает данный вариант наиболее перспективным для будущей реализации ИК-сети.

В таблице представлены результаты проведенных исследований.

Дальнейшее увеличение скорости требует более точной настройки переменного резистора, который определяет границу переключения сигнала, либо использование триггера Шмитта для разнесения пороговых напряжений.

Таблица

Сравнение реализаций схем

| Вариант реализации              | Метод приема       | Максимальная скорость |
|---------------------------------|--------------------|-----------------------|
| АЦП и пользовательский протокол | Аналоговый вход    | 0,1 Кбит/с            |
| UART и транзистор               | Цифровой вход (RX) | 20 Кбит/с             |
| UART и компаратор               | Цифровой вход (RX) | 150 Кбит/с            |

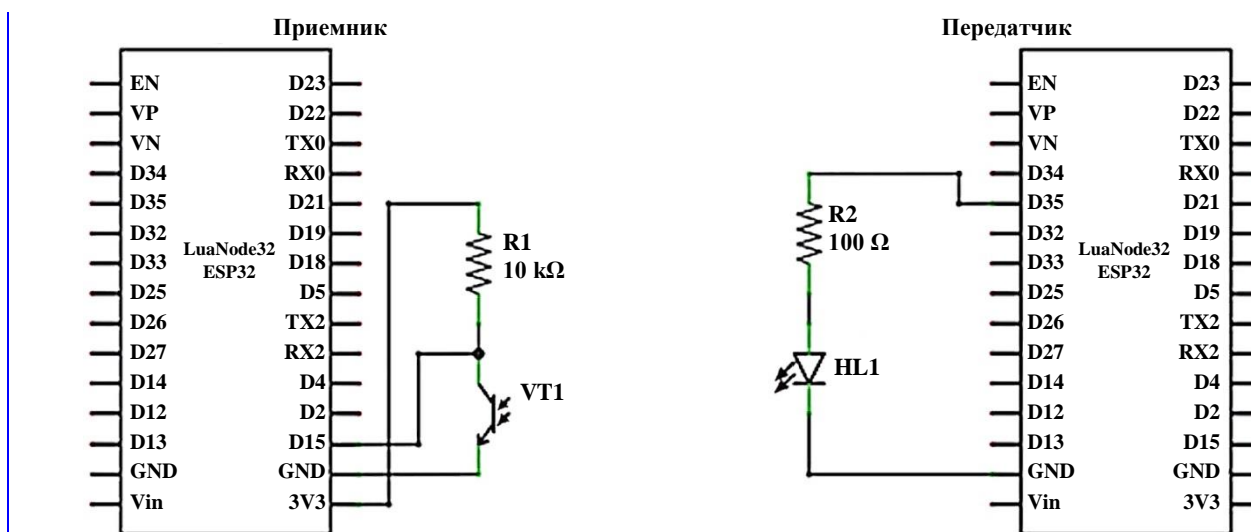


Рис. 1. Схема подключения для варианта с аналого-цифровым преобразователем

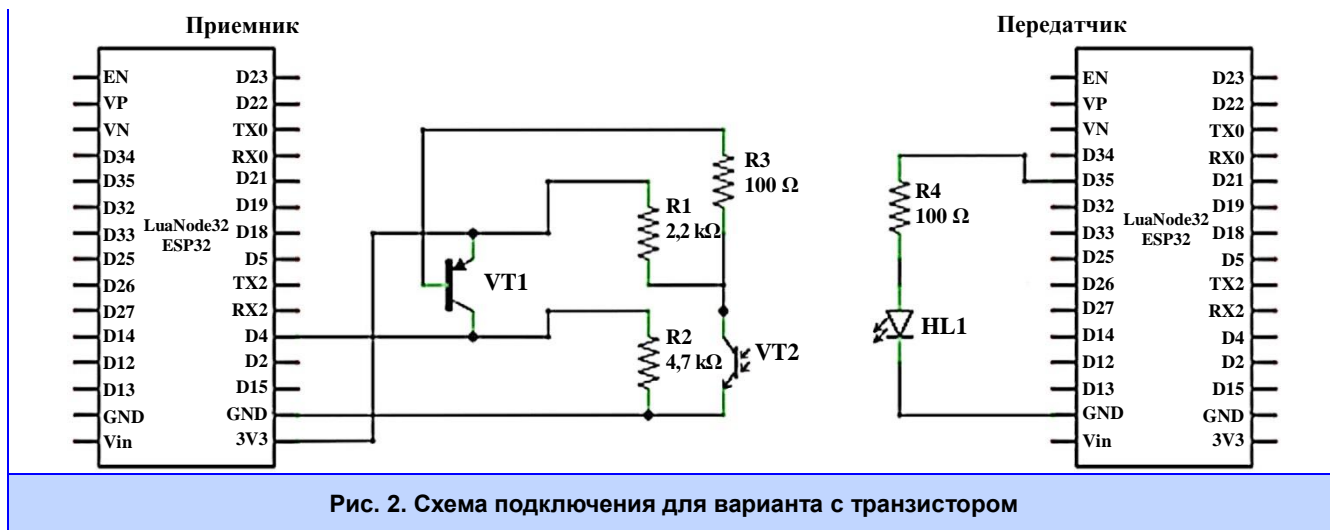


Рис. 2. Схема подключения для варианта с транзистором

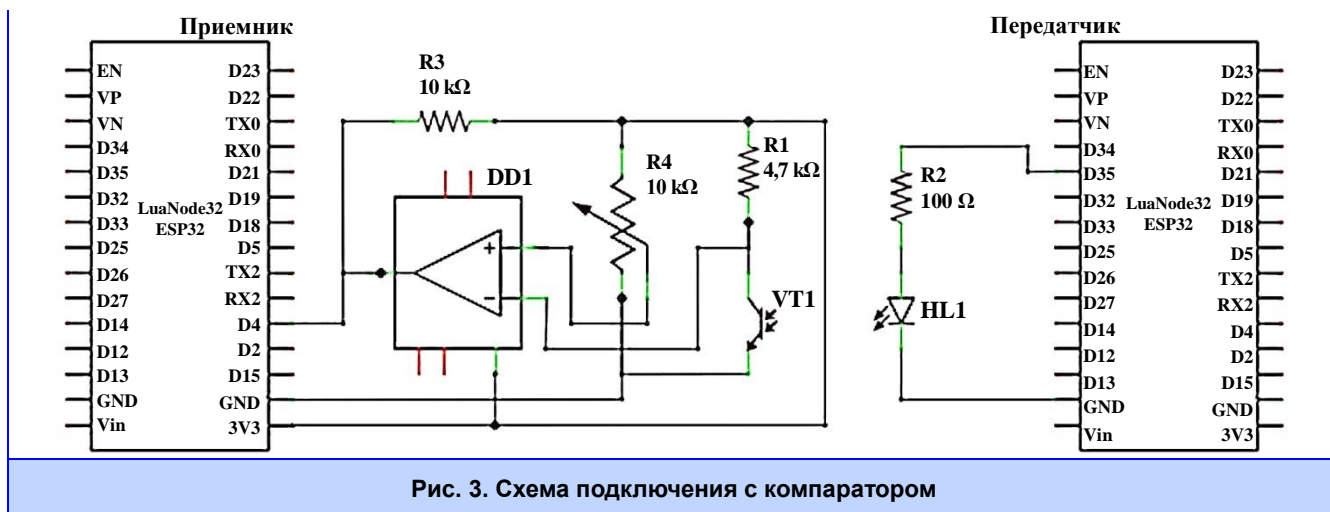


Рис. 3. Схема подключения с компаратором

### Заключение

Результаты проведённых экспериментов показывают, что даже при использовании доступных компонентов возможно построение оптической беспроводной линии связи, способной обмениваться данными с достаточно высокой скоростью.

Наибольшую эффективность по скорости передачи данных показала архитектура с компаратором и UART, обеспечивающая скорость до 150 Кбит/с.

На следующем этапе планируются дальнейшие тесты с различными схемами подключения, интерфейсами и протоколами передачи данных, направ-

ленные на повышение устойчивости, дальности и скорости связи.

Особое внимание будет уделено исследованию альтернативных способов модуляции сигнала, применению аппаратных фильтров [6, 9, 10] и улучшенных схем согласования [7, 8, 9], что позволит минимизировать помехи и искажения при приёме сигнала.

Полученные данные станут основой для разработки масштабируемой архитектуры ИК-сети, способной обслуживать несколько клиентов одновременно с надёжной синхронизацией и минимальной задержкой.

### Список источников

1. Леонтьев А. С., Жматов Д. В. Исследование вероятностно-временных характеристик беспроводных сетей с методом доступа CSMA/CA // Russian Technological Journal. 2024. Т. 12. № 2. С. 67–76. DOI : 10.32362/2500-316X-2024-12-2-67-76.
2. Congestion control in Internet of Things: Classification, challenges, and future directions / V. K. Jain [et al.] // Sustainable Computing: Informatics and Systems. 2022. Vol. 35. Pp. 100678. DOI : 10.1016/j.suscom.2022.100678.
3. Anitha P., Vimala H. S., Shreyas J. Comprehensive review on congestion detection, alleviation, and control for IoT networks // Journal of Network and Computer Applications. 2024. Vol. 221. Pp. 103749. DOI : 10.1016/j.jnca.2023.103749.

4. Eliot: enhancing LiFi for next- generation Internet of things / J. P. M. G. Linnartz [et al.] // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2022. Vol. 89. № 1. 33 p. DOI : 10.1186/s13638-022-02168-6.
5. Analyzing Li-Fi Communication Benefits Compared to Wi-Fi / P. Yarbrough [et al.] // International Journal of Communications Network and System Sciences. 2022. Vol. 15. № 6. Pp. 67–77. DOI : 10.4236/ijcns.2022.156006.
6. Ambient light suppression in visible light transceivers: A review / M. Ahmed [et al.] // 2021 4th International Conference on Circuits, Systems and Simulation (ICSSS). 2021. 5 p. DOI : 10.1109/ICSSS51193.2021.9464174.
7. Abdalla I., Rahaim M. B., Little T. D. C. Interference in multi-user optical wireless communications systems // Philosophical Transactions A. 2020. Vol. 378. № 2169. 24 p. DOI : 10.1098/rsta.2019.0190.
8. Miramirkhani F., Uysal M. Channel modelling for indoor visible light communications // Philosophical Transactions A. 2020. Vol. 378. № 2169. Pp. 20190187.
9. A review of indoor optical wireless communication / H. Weng [et al.] // Photonics. 2024. Vol. 11. № 8. Pp. 722. DOI : 10.3390/photonics11080722.
10. Visible light communication: Concepts, applications and challenges / L. E. M. Matheus [et al.] // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2019. Vol. 21. № 4. Pp. 3204-3237. DOI : 10.1109/COMST.2019.2913348.

### References

1. Leontyev A. S., Zhatov D. V. Study of the probabilistic and temporal characteristics of wireless networks using the CSMA/CA access method // Russian Technological Journal. 2024. Vol. 12. No. 2. Pp. 67–76. DOI : 10.32362/2500-316X-2024-12-2-67-76.
2. Congestion control in Internet of Things: Classification, challenges, and future directions / V. K. Jain [et al.] // Sustainable Computing: Informatics and Systems. 2022. Vol. 35. Pp. 100678. DOI : 10.1016/j.suscom.2022.100678.
3. Anitha P., Vimala H. S., Shreyas J. Comprehensive review on congestion detection, alleviation, and control for IoT networks // Journal of Network and Computer Applications. 2024. Vol. 221. Pp. 103749. DOI : 10.1016/j.jnca.2023.103749.
4. Eliot: enhancing LiFi for next- generation Internet of things / J. P. M. G. Linnartz [et al.] // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2022. Vol. 89. № 1. 33 p. DOI : 10.1186/s13638-022-02168-6.
5. Analyzing Li-Fi Communication Benefits Compared to Wi-Fi / P. Yarbrough [et al.] // International Journal of Communications Network and System Sciences. 2022. Vol. 15. № 6. Pp. 67–77. DOI : 10.4236/ijcns.2022.156006.
6. Ambient light suppression in visible light transceivers: A review / M. Ahmed [et al.] // 2021 4th International Conference on Circuits, Systems and Simulation (ICSSS). 2021. Pp. 207–211. DOI : 10.1109/ICSSS51193.2021.9464174.
7. Abdalla I., Rahaim M. B., Little T. D. C. Interference in multi-user optical wireless communications systems // Philosophical Transactions A. 2020. Vol. 378. № 2169. 24 p. DOI : 10.1098/rsta.2019.0190.
8. Miramirkhani F., Uysal M. Channel modelling for indoor visible light communications // Philosophical Transactions A. 2020. Vol. 378. № 2169. Pp. 20190187.
9. A review of indoor optical wireless communication / H. Weng [et al.] // Photonics. 2024. Vol. 11. № 8. Pp. 722. DOI : 10.3390/photonics11080722.
10. Visible light communication: Concepts, applications and challenges / L. E. M. Matheus [et al.] // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2019. Vol. 21. № 4. Pp. 3204-3237. DOI : 10.1109/COMST.2019.2913348.

Поступила в редакцию 16.11.2025

The article was submitted 16.11.2025

---

### Информация об авторах

*Дмитрий Андреевич Ермолаев* – студент, т. +7 (968) 398-71-55, e-mail: dimkamoto@gmail.com;

*Ольга Вадимовна Тихонова* – доктор технических наук, профессор, т. +7 (916) 523-35-68,  
e-mail: o\_tikhonova@inbox.ru;

*Александр Александрович Бондарь* – кандидат технических наук, доцент, т. +7 (916) 024-76-56,  
e-mail: alex.kvitkovsky@yandex.ru;

*Максим Дмитриевич Глотов* – аспирант, т. 8 (499) 132-64-95, e-mail: m.glotov@lebedev.ru.

### Information about the authors

*Dmitry Andreevich Ermolaev* – Student, t. +7 (968) 398-71-55, e-mail: dimkamoto@gmail.com;

*Olga Vadimovna Tikhonova* – Doctor of Technical Sciences, Professor, t. +7 (916) 523-35-68,  
e-mail: o\_tikhonova@inbox.ru;

*Alexander Alexandrovich Bondar* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, t. +7 (916) 024-76-56,  
e-mail: alex.kvitkovsky@yandex.ru;

*Maxim Dmitrievich Glotov* – Postgraduate Student, t. 8 (499) 132-64-95, e-mail: m.glotov@lebedev.ru.