
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ
OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND COMPLEXES

УДК 621.383
DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-1-80-95

**ПРОТОТИП СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА С ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕМ
ПО ОПТИЧЕСКОМУ ВОЛОКНУ**

А. А. ГАРКУШИН^{1,2}, В. В. КРИШТОП^{1,2,3*}, И. Л. ВОЛЬХИН^{2,3}, Р. П. РАСУЛЕВ^{2,4},
Е. В. НИФОНТОВА^{1,2}, И. В. КАДОЧИКОВ^{1,2}, В. А. МАКСИМЕНКО¹,
А. В. ПЕРМИНОВ¹, Д. И. ШЕВЦОВ^{1,2,3}

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия
*Krishtop@pnppk.ru

²Пермская научно-производственная приборостроительная компания,
Пермь, Россия

³Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

⁴Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В. И. Ульянова (Ленина),
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Исследованы возможности готовых систем электроснабжения по оптическому волокну (PoF-платформ) малой мощности до единиц ватт для разработки систем сбора информации, поступающей с датчика угарного газа. Продемонстрирована работоспособность системы, отмечены ее недостатки: низкий коэффициент полезного действия, сложность модернизации, отсутствие системы регулировки мощности лазерного диода с компьютерным управлением через микроконтроллер. Разработана система энергоснабжения по оптическому волокну средней мощности (десятки ватт), на основе которой создан прототип системы мониторинга удаленных датчиков физических величин. Проведено испытание прототипа в различных режимах работы. Выработаны рекомендации по использованию количества каналов энергоснабжения в зависимости от пиковой электрической мощности, потребляемой отдельными датчиками и системой в целом. Разработаны рекомендации по оптимизации режимов работы с целью повышения коэффициента полезного действия и надежности системы путем уменьшения рабочей температуры лазерного диода и фотоэлектрического преобразователя.

Ключевые слова: энергоснабжение, датчики, оптическое волокно, фотоэлектрический преобразователь, система электроснабжения через оптоволокно

Благодарности: исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0005).

Ссылка для цитирования: Гаркушин А. А., Криштоп В. В., Вольхин И. Л., Расулев Р. П., Нифонтова Е. В., Кадочиков И. В., Максименко В. А., Перминов А. В., Шевцов Д. И. Прототип системы мониторинга с энергоснабжением по оптическому волокну // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 1. С. 80—95. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-1-80-95.

PROTOTYPE OF MONITORING SYSTEM WITH POWER SUPPLY VIA OPTICAL FIBER

A. A. Garkushin^{1,2}, V. V. Krishtop^{1,2,3*}, I. L. Volkhin^{2,3}, R. P. Rasulev^{2,4},
E. V. Nifontova^{1,2}, I. V. Kadochikov^{1,2}, V. A. Maksimenko¹,
A. V. Perminov¹, D. I. Shevtsov^{1,2,3}

© Гаркушин А. А., Криштоп В. В., Вольхин И. Л., Расулев Р. П., Нифонтова Е. В., Кадочиков И. В., Максименко В. А., Перминов А. В., Шевцов Д. И., 2024

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia
Krishtop@pnppk.ru

²Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company, Perm, Russia

³Perm State University, Perm, Russia

⁴St. Petersburg Electrotechnical University „LETI“, St. Petersburg, Russia

Abstract. The capabilities of ready-made units of power supply via optical fiber (PoF platforms) of low power up to a few watts for the development of systems for collecting information coming from a carbon monoxide sensor are investigated. The operability of the system is demonstrated, its shortcomings are noted: low efficiency, complexity of modernization, lack of a system for adjusting the power of a laser diode with computer control through a microcontroller. A power supply system via medium-power optical fiber (tens of watts) is developed, on the basis of which a prototype system for monitoring remote sensors of physical quantities is created. The prototype is tested in various operating modes. Recommendations are given for the use of the number of power supply channels depending on the peak electrical power consumed by individual sensors and the system as a whole. Recommendations have been developed for optimizing operating modes in order to increase the efficiency and reliability of the system by reducing the operating temperature of the laser diode and photoelectric converters.

Keywords: energy supply, sensors, fiber optic, photoelectric converter, power-over-fiber (PoF)

Acknowledgments: the research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSNM-2023-0005).

For citation: Garkushin A. A., Krishtop V. V., Volkhin I. L., Rasulev R. P., Nifontova E. V., Kadochikov I. V., Maksimenko V. A., Perminov A. V., Shevtsov D. I. Prototype of monitoring system with power supply via optical fiber. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 1. P. 80—95 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-1-80-95.

Введение. Современной тенденцией конструирования систем мониторинга является стремление к интеграции различных функций в одном устройстве, в том числе передачи данных и проведения измерений физических величин [1]. Представляется целесообразным в такую систему добавить еще и функцию электроснабжения для питания датчиков. Существуют разные методы передачи электроэнергии от источника к потребителю: прямой, комбинированный и способ с использованием преобразования электричества в другой вид энергии [2—4]. Последние достижения в области оптоволоконных и фотонных технологий [5—10] позволяют создавать системы мониторинга состояния удаленных объектов с энергоснабжением через оптическое волокно (технология PoF) и вакуум/воздух (технология OWPT) [11].

PoF-системы (Power-over-Fiber) работают по принципу двойного преобразования энергии: электрической в оптическую при вводе в оптическое волокно и обратное из оптической в электрическую на выходе из него. Как и все системы двойного преобразования, она имеет свои преимущества и недостатки. Сложность построения схемы двойного преобразования энергии и неизбежное возрастание энергетических потерь предполагают ее использование для энергоснабжения в особых случаях, когда прокладка традиционных линий электропередачи невозможна, затруднена, экономически нецелесообразна или опасна. Основные преимущества выбранной схемы передачи энергии — взрыво- и пожаробезопасность, отсутствие металлических проводов, меньшие габариты и масса „силового“ кабеля энергоснабжения. Области применения подобных систем являются в первую очередь пожароопасные и взрывоопасные производства, где применение обычных схем электропитания с использованием электрических кабелей может привести к аварийным ситуациям [12, 13]. Кроме того, подобные системы могут найти широкое применение в системах контроля, находящихся в труднодоступных местах, в которых прокладка и эксплуатация электрических кабелей нецелесообразна [14]. Наиболее эффективно использование указанных систем при работе с современными миниатюрными датчиками с незначительным (единицы-десятки ватт) потреблением энергии. Дополнительным преимуществом является возможность обеспечивать двусторонний обмен информацией между центральным процессором и удаленными терминалами по оптическому волокну, проложенному в составе того же оптического кабеля [15, 16], или даже по

одному оптическому волокну электроснабжения и обмена информацией. В настоящей работе представлены результаты исследования прототипа подобной системы.

Цель настоящей статьи — создание прототипа системы мониторинга удаленных датчиков физических величин с энергоснабжением по оптическому волокну. Для этого необходимо выполнить несколько этапов исследований:

1) исследовать возможности готовых PoF-платформ малой мощности (от сотен милливатт до единиц ватт) для разработки систем сбора информации, поступающей с удаленных датчиков физических величин;

2) снять энергетические характеристики с фотоэлектрического преобразователя (ФЭП) с рабочими мощностями оптического излучения до десятков ватт, одного из наиболее важных компонентов PoF-систем;

3) изготовить прототип системы мониторинга с энергоснабжением по оптическому волокну и испытать его в режиме реального времени при работе нескольких датчиков физических величин.

Результаты исследования PoF-системы малой мощности. В качестве датчика использован датчик угарного газа, критерием выбора которого служила небольшая потребляемая мощность (менее 200 мВт). PoF-система малой мощности для сбора информации (мониторинга) датчика угарного газа с энергоснабжением по оптическому волокну имеет модульную конструкцию, состоящую из четырех частей: модуля передачи, соединительного оптического кабеля, модуля приема и датчика угарного газа (рис. 1).

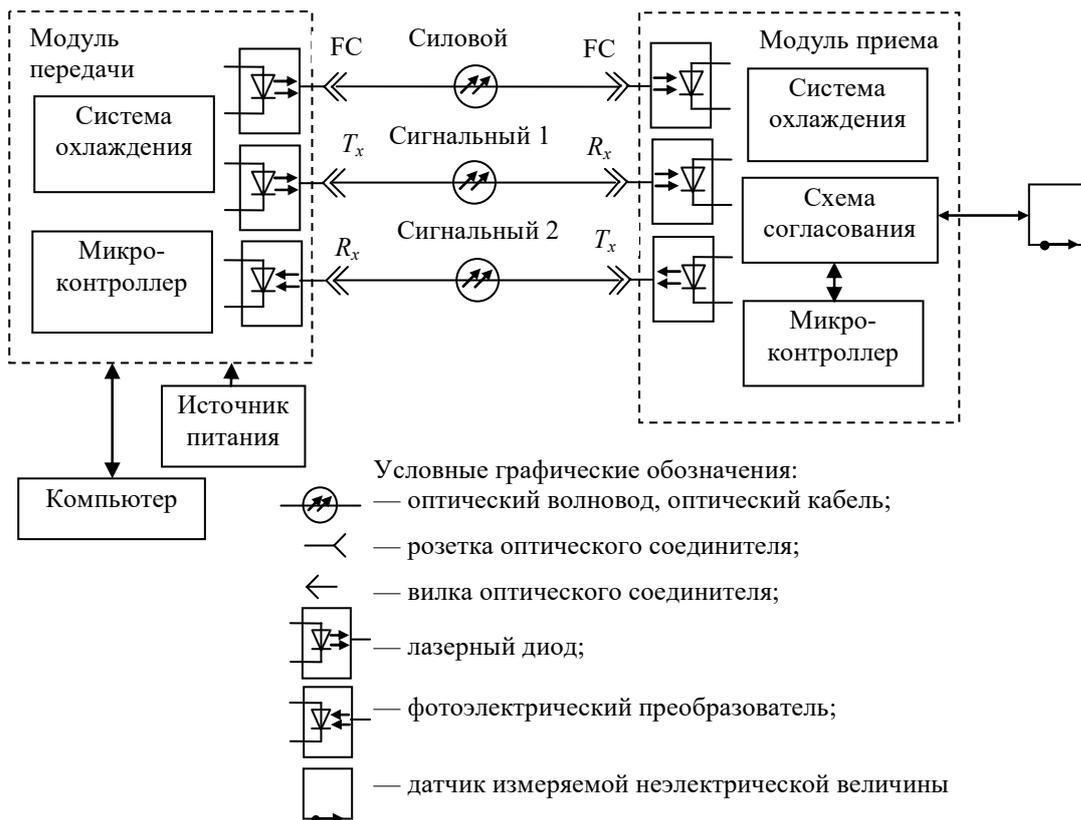


Рис. 1

Модуль передачи выполняет несколько функций: преобразует электрическую энергию источника питания в оптическую, обеспечивает двусторонний обмен информацией с модулем приема и имеет связь с управляющим компьютером, который контролирует работу всей системы мониторинга и выводит собранную модулем приема информацию в удобном для оператора виде. Он смонтирован на плате и включает в себя: лазерный диод с системой охлаждения (элемент Пельтье с вентилятором), два оптических трансивера для обмена информацией

с приемным модулем, микроконтроллер марки STM32F407, а также электрические и оптические коннекторы. К электрическим коннекторам подключаются внешний источник питания электрической мощностью до 50 Вт и персональный компьютер контроля состояния системы. К оптическим коннекторам подключаются многомодовые оптические волокна с германо-силикатными сердцевинами диаметром 62,5 мкм: FC — „силовое“ оптическое волокно энергоснабжения; ST — два сигнальных оптических волокна, один канал (T_x) — для передачи, другой (R_x) — для приема информации. Для исключения влияния потерь энергии при передаче длина каждого оптического волокна составляет 2 м. В реальных системах длина оптических кабелей может быть увеличена до 20 км, что вносит дополнительные потери 2,5—3 дБ/км [17].

Использование систем охлаждения связано с необходимостью отвода тепла от наиболее горячих элементов системы энергоснабжения — лазерного диода и фотоэлектрического преобразователя для обеспечения рекомендованных производителем температурных режимов и предотвращения деградации основных характеристик. Наиболее энергоемким является первичный преобразователь энергии — полупроводниковый лазерный диод, система охлаждения которого представляет собой элемент Пельтье с радиатором и вентилятором. Система охлаждения потребляет дополнительную энергию от сети, что снижает общий КПД системы электропитания. Следует отметить, что это не является критичным, вследствие того, что энергия потребляется от первичной силовой сети и не оказывает влияния на КПД системы вторичного электропитания. Отвод тепла от вторичного преобразователя происходит пассивно, путем рассеяния энергии в окружающую среду. Для более эффективного теплоотвода использован радиатор с зачерненной поверхностью большой площади охлаждения.

Энергопотребление модуля передачи зависит от режима его работы. Во всех режимах для управления электроникой (микропроцессором и др.) используется напряжение питания 3,3 В при токе 0,064 А, таким образом, потребляемая мощность составляет $P_{\text{упр}}=0,21$ Вт. Все измерения электрических и оптических величин в настоящей работе выполнены с использованием метрологически поверенных приборов. Для питания лазерного диода в рекомендованном производителем непрерывном режиме оптической генерации применяется напряжение 5 В при токе 1,64 А, что соответствует электрической мощности $P_{\text{лаз.эл}}=8,2$ Вт. При этом мощность оптического излучения составляет $P_{\text{лаз.опт}}=2,5$ Вт. Таким образом, КПД преобразования электрической мощности в оптическую платформы PoFs

$$\eta_{\text{оэ}} = \frac{P_{\text{лаз.опт}}}{P_{\text{лаз.эл}}} \cdot 100 \% = 30,5 \%$$

Потребление элемента Пельтье системы охлаждения измерялось в разных режимах работы: в установившемся режиме (далее — УР) при достижении температуры стабилизации лазерного диодного модуля и в максимальном режиме (МР). Потребление при питании от источника 5 В составляет 0,66 и 1,26 А соответственно, что соразмерно мощности $P_{\text{Пел}}$, равной 3,3 и 6,3 Вт. Общая потребляемая мощность модуля преобразования от источника питания без учета энергии, необходимой для работы самого источника питания и компьютера управления, составляет

$$P_{\text{перв}} = P_{\text{упр}} + P_{\text{Пел}} + P_{\text{лаз.эл}} = 11,7—14,7 \text{ Вт.}$$

В качестве основы для создания прототипа системы мониторинга датчика угарного газа использовано готовое коммерческое решение фирмы MH GoPower — „платформа PoFs“ малой мощности. Фотография изготовленного прототипа представлена на рис. 2. Основные характеристики платформы PoFs приведены в спецификации [18].

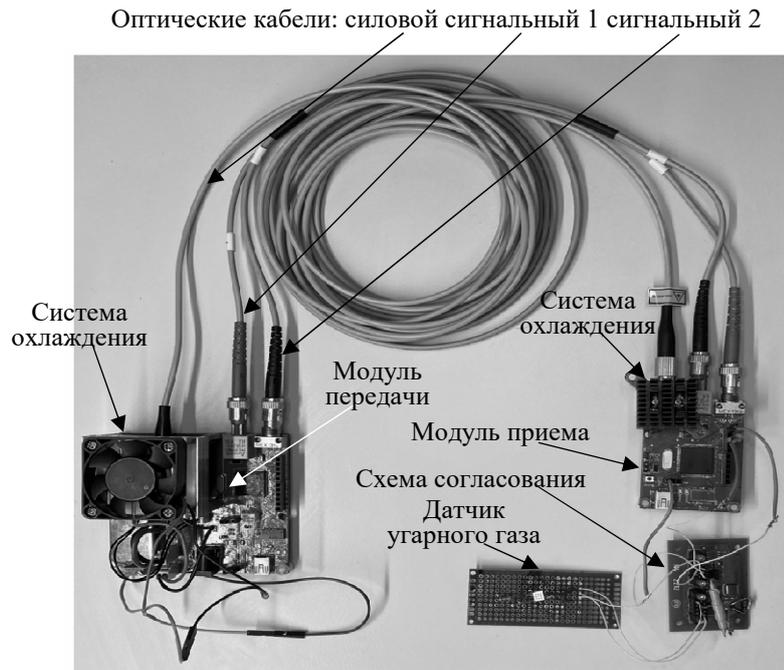


Рис. 2

Используемая в экспериментах оптическая мощность лазерного излучения составляла 2,5 Вт на длине волны 980 нм. Перенос энергии по оптическому волокну происходил на гибридной волне TE_{11} (фундаментальная мода) [19].

Модуль приема имеет силовой фотоэлектронный преобразователь марки YCH-L250. В оригинальной конструкции охлаждение осуществляется путем пассивного рассеяния избыточного тепла в окружающую среду, что при работе в режиме максимальной отдаваемой электрической мощности накладывало ограничения на верхний температурный предел. Для улучшения теплового режима работы преобразователя система охлаждения была дополнена пассивным радиатором. Для обмена информацией с модулем передачи установлены два оптических трансивера, один — приемный, второй — передающий. Микроконтроллер STM32F407 управляет работой электроники модуля приема, а также системой согласования с датчиком угарного газа. На плате модуля приема также размещены оптические и электрические коннекторы. В ходе эксперимента установлено, что максимальная электрическая мощность вторичного источника электропитания, которым является фотоэлектрический преобразователь, $P_{вт}$ составляет 271 мВт при напряжении 5,9 В и силе тока 46 мА. Из них мощность $P_{потр}$, доступная потребителю, составляет примерно 200 мВт при напряжении 5 В и токе до 40 мА. Остальная энергия расходуется на поддержание работы входящих в модуль приема схемы согласования и микроконтроллера (см. рис. 1).

Таким образом, КПД источника вторичного электропитания платформы PoFs

$$\eta_{ист} = \frac{P_{вт}}{P_{перв}} \cdot 100 \% = 1,8 \% (MP); 2,3 \% (УР),$$

а КПД потребителя

$$\eta_{потр} = \frac{P_{потр}}{P_{перв}} \cdot 100 \% = 1,4 \% (MP); 1,7 \% (УР).$$

Под $P_{перв}$ подразумевается электрическая энергия, потребляемая лазерным диодом, его системой охлаждения и электронными компонентами системы. Следует отметить, что основные потери энергии происходят в системе охлаждения лазерного диода и общая потребляемая от первичной силовой сети энергия с учетом работы источника электропитания модуля

передачи не превышает 50 Вт, а с учетом работы компьютера не более 100 Вт. Таким образом, общая мощность, потребляемая системой, является приемлемой, а мощности вторичного электропитания оказывается достаточно для обеспечения работы одного удаленного датчика угарного газа.

Выбор датчика угарного газа обусловлен требованиями к его чувствительности, электрическими характеристиками модуля приема и коммерческими предложениями на рынке. В табл. 1 приведены основные характеристики доступных датчиков угарного газа (согласно спецификации).

Таблица 1

Параметр	Требования к датчику	MC101	MC115	GM-702B	TGS2442	GST-4S-CO
Диапазон измерения	—	—	—	5—5000	30—1000	0—2000
Напряжение цепи	—	—	—	≤24 DC	5,0 V ± 0,2 V DC	
Рабочее напряжение, В	5	3,0±0,1	3,0±0,1	2,5 ± 0,1 AC/DC (высокая температура), 0,5±0,1 AC/DC (низкая температура)	4,8 ± 0,2 DC	1,3 (max)
Потребляемая мощность, мВт	200	330	315	≤50	974	1300 (max)
Потребляемый ток, мА	40	110±10	105±10	20 (высокая температура), 100 (низкая температура)	203	<1000 (max)
Цена, руб.	—	460	1370	720	—	—
Газ	Угарный газ	Угарный газ и алканы	Угарный газ и алканы	Угарный газ	Угарный газ	Угарный газ

По результатам анализа выбран датчик угарного газа GM-702B, удовлетворяющий заявленным требованиям.

Для проверки работоспособности системы был проведен оценочный эксперимент, схема которого представлена на рис. 3. В контейнер с внутренними размерами 270×195×160 мм помещались два датчика концентрации монооксида углерода (угарного газа) GM-702B. Эксплуатация указанного типа датчиков имеет свои особенности: первичной измеряемой физической величиной является концентрация угарного газа, которая изменяет химический баланс чувствительного элемента и, как следствие, его электрическое сопротивление. Для работы датчика необходимо подать два напряжения питания: низковольтное 2,5±0,1 В и высоковольтное 5,0±0,1 В. Выходной сигнал — напряжение U_1 и U_2 — снимается с резистора $R=5$ кОм. Производителем особое внимание уделено сложной нелинейной зависимости измеряемого напряжения от концентрации угарного газа, которая зависит от многих факторов: концентрации угарного и других (метана, водорода) газов, температуры, времени хранения без напряжений питания, а также памяти о предыдущем состоянии и небольшой временной нестабильности [20]. Таким образом, измерение абсолютного значения концентрации угарного газа представляет собой сложную задачу и требует дополнительной калибровки проходной характеристики датчика. Согласно рекомендации производителя, перед началом работы следует выдержать датчик под напряжением в течение не менее 48 ч. В настоящем эксперименте использованы два датчика: один — выдержанный под напряжением (режим „горячего старта“), другой — не выдержанный (режим „холодного старта“). Цель эксперимента — определить работоспособность датчиков и возможную погрешность измерений в режиме „холодного старта“.

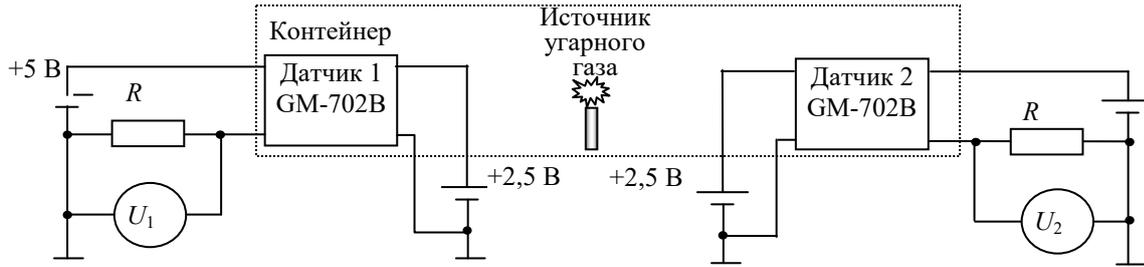


Рис. 3

Результаты эксперимента представлены на рис. 4: цифрами обозначены номера опытов; серой линией показана зависимость напряжения на выходе датчика в режиме „холодного старта“, черной линией — в режиме „горячего старта“. Для проведения качественного эксперимента модельным источником угарного газа служила горящая хозяйственная спичка. Условия проведения эксперимента — количество модельных источников, число зажиганий и наличие внешнего доступа воздуха — приведены в табл. 2.

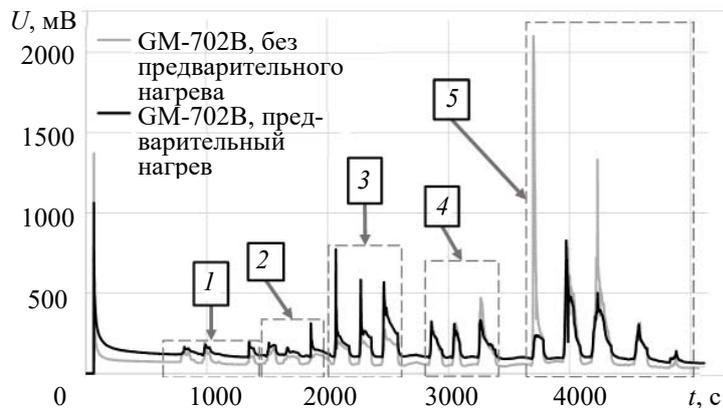


Рис. 4

Таблица 2

Номер опыта	Количество модельных источников угарного газа	Количество повторений (пики на графиках рис. 4)	Внешний доступ воздуха
1	1	3	Нет
2	2	3	Нет
3	3	3	Нет
4	6	3	Нет
5	6	4	Есть

Как видно из графиков, приведенных на рис. 4, при отсутствии угарного газа напряжение на выходе датчика в режиме „холодного старта“ меньше, чем в режиме „горячего старта“.

При выделении угарного газа оба датчика реагируют на увеличение его концентрации практически одновременно. В первых трех опытах наблюдается увеличение выходного напряжения, причем реакция датчика в режиме „горячего старта“ более сильная. Изменение выходного напряжения датчика качественно соответствует характеристикам, приведенным в спецификации [20]. В четвертом опыте количество кислорода в замкнутом объеме контейнера уменьшилось, спички стали догорать не до конца, что привело к уменьшению концентрации угарного газа и, как следствие, уменьшению выходного сигнала каждого из датчиков. Повторный опыт был проведен при наличии зазора между контейнером и рабочей поверхностью, что обеспечило приток воздуха через небольшую щель. В связи с возникшей конвекцией воздушных масс датчики угарного газа оказались в разных условиях: на датчик в режиме „холодного старта“ попало больше угарного газа, что привело к первому и третьему выбросам напряжения в пятом эксперименте; постепенный спад показаний датчиков связан с вы-

жиганием кислорода. По окончании опытов показания датчиков в отсутствие угарного газа сблизались вследствие того, что датчик, начавший работу в режиме „холодного старта“, частично восстановил свою чувствительность.

Результаты эксперимента показали, что датчики угарного газа работоспособны, выходное напряжение датчика в режиме „горячего старта“ превышает показания в режиме „холодного старта“ не более, чем в два раза и с течением времени расхождение уменьшается, локальное изменение концентрации угарного газа оказывает на порядок большее изменение показаний. Для точной количественной оценки концентрации заданного типа газа в дальнейшем необходимо разработать специальный алгоритм функционирования системы, а также методику калибровки датчиков.

После тестирования датчиков на специальном рабочем месте (см. рис. 3) была собрана система мониторинга на базе платформы PoFs, по своему функциональному назначению похожая на систему [12] с применением одного из датчиков. Испытания датчика угарного газа в составе системы показали аналогичные результаты, что подтверждает работоспособность прототипа PoF-системы малой мощности для сбора информации с датчика угарного газа.

Исследование энергетических характеристик PoF-системы средней мощности. Как было отмечено выше, в системе питания PoF происходит двойное преобразование энергии: электрической в оптическую при вводе в оптическое волокно и обратное из оптической в электрическую на выходе из него, что приводит к существенному, на один порядок, увеличению энергетических потерь по сравнению с традиционными системами электропитания по электрическим проводам. При увеличении энергопотребления модулем приема с подключенными к нему датчиками потери энергии становятся критическими до величин порядка десятков ватт. Анализ работы системы показал, что потери энергии в лазере компенсируются увеличением потребляемой от электрической сети мощности и не являются критическими. Потери в оптическом кабеле зависят от его характеристик, которые регламентируются изготовителем, и накладывают ограничение на расстояние между модулями передачи и приема [21, 22]. Наиболее критические потери происходят в фотоэлектрическом преобразователе. Поэтому было проведено отдельное исследование его основных характеристик, в частности исследована нагрузочная характеристика ФЭП YCH-H6424[23] по схеме, приведенной на рис. 5.

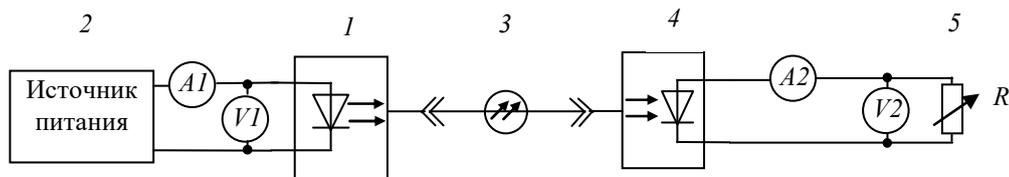


Рис. 5

Источником лазерного излучения служил регулируемый по мощности от 0,25 до 70 Вт на длине волны 980 нм твердотельный лазерный диод 1 (K976DA5RN-70.00W) [24] с блоком питания 2 (GPD 74303S). Многомодовый оптический кабель 3 длиной 2 м использовался для подачи оптической мощности на вход ФЭП 4, нагрузкой которого служил магазин сопротивлений 5. Для контроля мощности на входе первичного преобразователя и выходе вторичного использовались амперметры и вольтметры A_1 , V_1 и A_2 , V_2 , соответственно (осциллограф-мультиметр АКПП-4125/4А). Эксперимент проводился в лабораторных условиях при температуре окружающей среды 23 °С и влажности порядка 50 %. Для отведения избыточного тепла фотоэлектрический преобразователь был установлен на специально разработанную систему охлаждения на тепловых трубках, как показано на рис. 6.

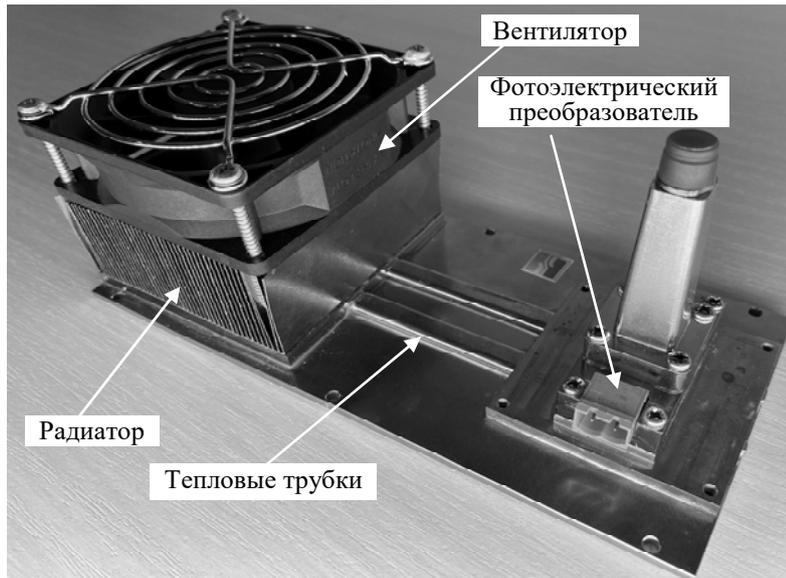


Рис. 6

В результате получено двенадцать семейств нагрузочных характеристик — зависимости мощности P , выделяющейся в нагрузку, от различных сопротивлений R , определенных при оптической мощности лазерного излучения от 0,5 до 16 Вт; пять из них приведены на рис. 7, где 1 — $P_{\text{опт}}=0,5$ Вт; 2 — $P_{\text{опт}}=2$ Вт; 3 — $P_{\text{опт}}=5$ Вт; 4 — $P_{\text{опт}}=10$ Вт; 5 — $P_{\text{опт}}=16$ Вт. Остальные имеют промежуточные значения. Для удобства анализа графики на рисунке представлены в полулогарифмическом масштабе. Все нагрузочные характеристики имеют максимум электрической мощности P_{max} , отдаваемой в нагрузку при определенном, для каждой оптической мощности разном, оптимальном сопротивлении нагрузки $R_{\text{опт}}$.

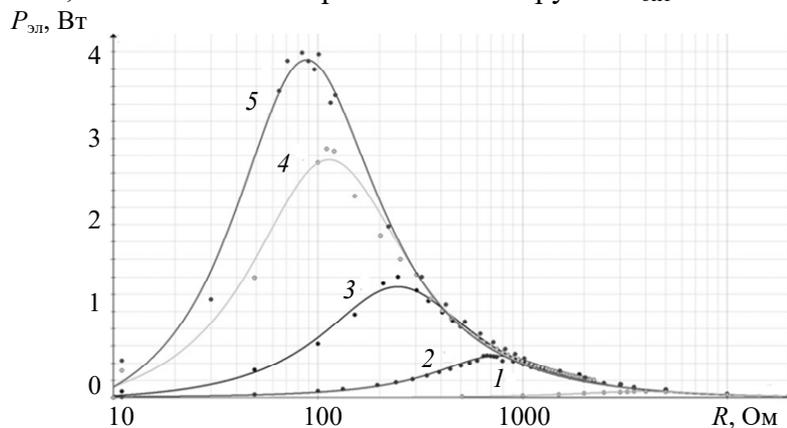
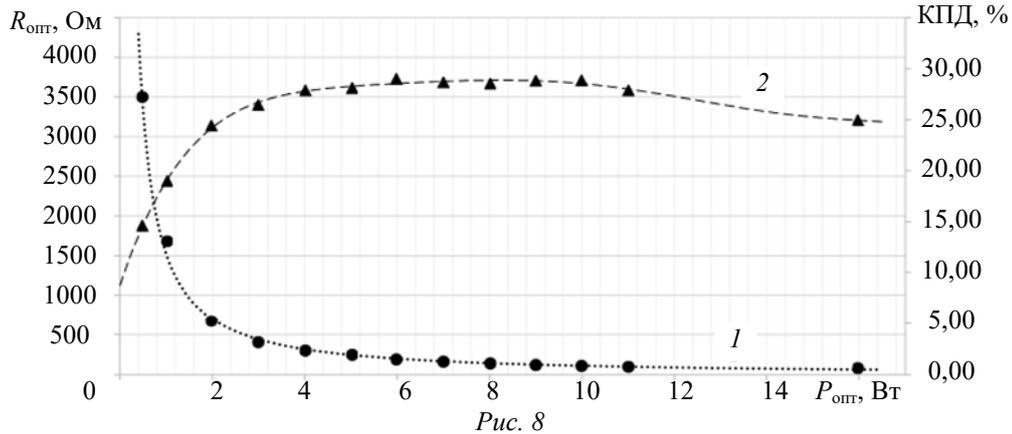


Рис. 7

По данным рис. 7 построены представленные на рис. 8 зависимости $R_{\text{опт}} = R_{\text{опт}}(P_{\text{max}})$ (кривая 1) и коэффициента полезного действия $\eta = \eta(P_{\text{max}})$ (кривая 2). Данные зависимости являются максимально достижимыми параметрами для исследуемой PoF-системы электроснабжения. Анализ зависимостей показывает, что можно выделить три области электрических мощностей: малых — от 0,5 до 2 Вт, средних — от 4 до 10 Вт и больших — до 50 Вт (в опытах исследовано только ее начало до 16 Вт). В области малых мощностей происходит существенное изменение параметров: $R_{\text{опт}}$ от 3500 до 600 Ом практически в 6 раз и КПД в 2 раза. При средних мощностях $R_{\text{опт}}$ изменяется незначительно в пределах 90...100 Ом, т.е. не более 10 %, и η остается практически постоянным и составляет примерно 28 %. В ходе экспериментов при $R_{\text{опт}}$, равном 11 и 16 Вт, установлено, что несмотря на использование системы охлаждения наблюдается разогрев корпуса фотоэлектрического преобразователя, что приводит к снижению КПД до 25 %, т.е. на 3 %. Наблюдаемый эффект можно объяснить снижением напряжения холостого хода и внутреннего сопротивления преобразователя при повышении температуры. Дальнейшее

увеличение мощности оптического излучения приведет к повышению температуры ФЭП и соответственно уменьшению КПД, что в целом согласуется с результатами [25].



По результатам исследований сделан вывод о необходимости разработки регулятора системы охлаждения, который при удаленном расположении модуля приема также потребует электропитания, что уменьшит общий КПД системы при работе с постоянной нагрузкой. Еще одна цепь регулировки потребует при работе системы в режиме переменной нагрузки. Оптимальным выходом является разработка дополнительной системы регулировки мощности оптического излучения лазера, что позволит согласовать генерируемую вторичным преобразователем мощность с мощностью, потребляемой нагрузкой. Параметр оптимизации системы регулирования связан с поддержанием оптической мощности, при которой система будет работать в области пика отдаваемой мощности в нагрузку. При этом будут минимизированы как тепловые потери фотоэлектрического преобразователя, так и общие энергетические потери PoF-системы в целом, даже при динамическом характере нагрузки.

Прототип системы мониторинга с энергоснабжением по оптическому волокну средней мощности. На основе графика, представленного на рис. 8, была собрана установка для исследования силовой части системы мониторинга (рис. 9), в которой в качестве нагрузки использованы датчик углекислого газа (CO_2) и IP-видеокамера.

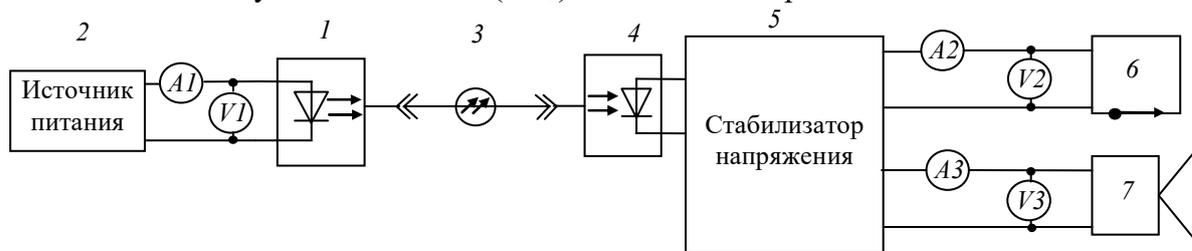


Рис. 9

Силовая часть системы мониторинга состоит из источника лазерного излучения 1 (K976DA5RN-70.00W) с блоком питания 2 (GPD 74303S), оптического кабеля 3, фотоэлектрического преобразователя 4 (YCH-H6424), стабилизатора напряжения 5, двух первичных датчиков концентрации углекислого газа 6 (HT-2000) и IP-видеокамеры 7 (из состава лабораторного стенда LA5001). Для управления работой IP-видеокамеры использован компьютер (на схеме не показан). Для мониторинга энергопотребления системой использованы: для источника лазерного излучения — амперметр A_1 и вольтметр V_1 (встроены в источник питания); для датчика уровня углекислого газа — амперметр A_2 и вольтметр V_2 (осциллограф-мультиметр АКПП-4125/4А) и для IP-видеокамеры — амперметр A_3 и вольтметр V_3 (осциллограф-мультиметр АКПП-4125/4А).

Результаты мониторинга энергопотребления приведены на рис. 10. По осям графика отложены: по оси абсцисс — текущее время эксперимента, по левой оси ординат — сила потребляемого электрического тока, по правой — соответствующая ей оптическая мощность

лазера. Временные зависимости энергетических характеристик изображены цветом: ток источника лазерного излучения A_1 — черным; ток датчика углекислого газа A_2 — светло-серым; ток видеокамеры — серым; мощность лазерного излучения — темно-серым.

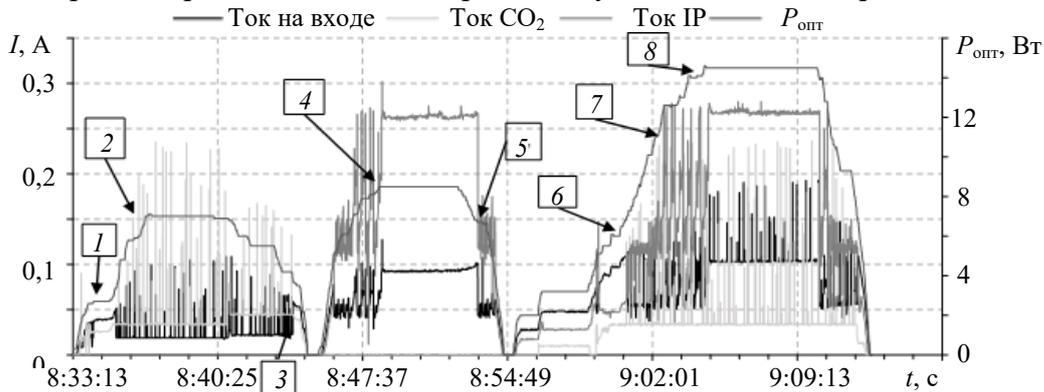


Рис. 10

Эксперимент позволил определить, при каких мощностях лазерного излучения может работать каждое из подключенных к стабилизатору вторичного напряжения выносных устройств: датчик концентрации углекислого газа, IP-видеокамера и оба устройства вместе.

Установлено восемь различных режимов энергопотребления системы мониторинга.

1. При $P_{\text{опт}}=2,7$ Вт устройство включается, но датчик CO_2 и IP-видеокамера не работают, что соответствует режиму „холодный старт“ системы в целом, включая модули передачи и приема.

2. При $P_{\text{опт}}=7$ Вт включается датчик CO_2 — режим „горячий старт“ модуля приема.

3. Отключение датчика CO_2 происходит при $P_{\text{опт}}=1,6$ Вт.

4. При $P_{\text{опт}}=8,5$ Вт включается IP-видеокамера, датчик CO_2 принудительно отключен.

5. Выключение IP-видеокамеры происходит при $P_{\text{опт}}=6,7$ Вт.

6. Совместно включенные датчик CO_2 и IP-видеокамера требуют большей мощности и режим „холодный старт“ сдвигается до уровня $P_{\text{опт}}=6$ Вт.

7. При $P_{\text{опт}}=11$ Вт в режиме „горячий старт“ включается датчик CO_2 .

8. Дальнейшее увеличение оптической мощности до 14 Вт приводит к включению IP-камеры.

Следует отметить, что испытания прототипа системы мониторинга с энергоснабжением по оптическому волокну проводились в динамическом (импульсном) режиме изменения сопротивления нагрузки. Так, в датчике концентрации углекислого газа чувствительный элемент NDIR-типа (недиспергирующий инфракрасный анализатор), потребляющий больше всего энергии в целях ее экономии и продления ресурса работы, включался периодически в соответствии со встроенным алгоритмом управления в режиме работы от аккумуляторных батарей. Указанный режим приводил к появлению кратковременных пульсаций потребляемого тока: светло-серые и черные всплески в режимах работы „горячий“ и „холодный старт“ соответственно.

При поступлении на вход вторичного преобразователя прямоугольного импульса оптической мощности лазерного излучения, изменяющегося от 0 до 6,7 Вт, мощность источника вторичного электропитания изменяется не мгновенно, и наблюдаются переходные процессы на графике потребляемого IP-камерой тока. На переднем фронте наблюдались кратковременные пульсации тока, выделенные на рисунке серым цветом. Пульсации обусловлены тем, что при запуске на начальном временном интервале энергии для перехода камеры в рабочий режим не хватало, камера выключалась и, в соответствии с алгоритмом работы, проводился повторный запуск через определенный промежуток времени. При возрастании энергии в цепи вторичного электропитания до требуемого уровня IP-видеокамера переходила в рабочий режим и пульсации тока прекращались. При переходе IP-видеокамеры в рабочий режим наблю-

дается максимальный выброс тока, что свидетельствует о наличии емкостной составляющей нагрузки. На заднем фронте импульса оптической мощности также наблюдались пульсации силы тока при уменьшении оптической мощности источника лазерного излучения.

По результатам опытов можно сделать вывод, что системы энергоснабжения по технологии PoF требуют введения обратной связи для регулировки мощности оптического излучения лазера в зависимости от уровня энергопотребления нагрузки. Это критически важно в случае комплексного сопротивления нагрузки, динамически изменяющегося с течением времени. Нехватка передаваемой энергии не позволяет вывести потребители энергии в рабочий режим, а при превышении необходимого уровня энергии происходит превращение ее излишков в тепловую энергию, перегревающую фотоэлектрический преобразователь. Перегрев приводит не только к снижению коэффициента полезного действия всей системы, но и к деградации характеристик фотоэлектрического преобразователя. Создание системы регулировки требует дополнительных исследований для разработки специального алгоритма управления, адаптированного к работе с системами мониторинга удаленных приборов с электропитанием по оптическому волокну.

При передаваемых мощностях порядка десятков ватт систему целесообразно дополнить датчиками температуры корпусов лазерного модуля и фотоэлектрического преобразователя и двумя вентиляторами для их охлаждения. Требуется экспериментально определить допустимое превышение регистрируемых температур относительно температуры окружающей среды с учетом диапазона ее колебаний. Необходимо разработать алгоритм оптимальной работы системы обратной связи, а также обеспечить совместимость каналов обмена информацией модулей передачи и приема для удаленного контроля состояния датчиков и регулирования энергетических характеристик системы электропитания по оптическому волокну. Параметром оптимизации системы является работа в области, близкой к оптимальному сопротивлению нагрузки.

Результаты (обсуждение предыдущего раздела). Таким образом, установлено, что пиковая оптическая мощность, необходимая для электропитания датчика CO₂, равна 7 Вт, а для IP-камеры — 8,5 Вт; для их совместной работы необходима мощность 14 Вт. Следует отметить, что суммарная пиковая потребляемая двумя устройствами мощность больше и составляет 15,5 Вт. Указанный эффект связан с тем, что пиковые мощности, потребляемые приборами, приходятся на различные промежутки времени. В ходе эксперимента превышение совместной потребляемой мощности, равной 14 Вт, зафиксировано не было. Таким образом, для экономии энергоресурсов лучше подключить два прибора одновременно к одному источнику лазерного излучения, чем к двум разным. Однако такое подключение имеет недостатки: большая выделяемая тепловая мощность источника лазерного излучения и фотопреобразователя, что требует их принудительного охлаждения. При увеличении передаваемой оптической мощности приходится увеличивать диаметр сердцевины оптического волокна. При различных рабочих напряжениях датчиков физических величин и IP-видеокамеры требуется дополнительное преобразование выходного напряжения фотоэлектрического преобразователя. При использовании независимых каналов передачи оптической энергии можно подобрать фотоэлектрические преобразователи с необходимыми выходными напряжениями. Таким образом, выбор одноканальной или многоканальной схемы энергоснабжения в качестве оптимальной зависит от количества первичных датчиков и их энергетических характеристик.

Заключение. Создан прототип системы мониторинга удаленных датчиков физических величин с энергоснабжением по оптическому волокну. Разработаны рекомендации по оптимизации режимов ее работы с целью повышения коэффициента полезного действия и надежности путем уменьшения рабочей температуры лазерного диода и фотоэлектрического преобразователя.

Наиболее важные результаты работы.

1. Исследованы возможности готовых PoF-платформ малой мощности (от сотен милливатт до единиц ватт) для разработки систем сбора информации, поступающей с датчика

угарного газа. Установлено, что готовое коммерческое решение фирмы МН GoPower — „платформа PoFs“ малой мощности удовлетворяет требованиям, предъявляемым к указанной системе. При этом отмечены его недостатки: низкий коэффициент полезного действия, неоптимальность — система оказалась „негибкой“, сложной для модернизации, отсутствует возможность встроить в модуль передачи систему регулировки мощности лазерного диода с компьютерным управлением через микроконтроллер.

2. Исследованы энергетические характеристики фотоэлектрического преобразователя (УСН-Н6424 фирмы МН GoPower) с рабочими мощностями оптического излучения до десятков ватт, одного из наиболее важных компонентов PoF-систем средней мощности. Проведены исследования с различными сопротивлениями нагрузки при мощностях оптического излучения от 0,5 до 16 Вт. Определены оптимальные сопротивления нагрузки, при которых система вторичного электропитания работает в режиме отдачи максимальной мощности в нагрузку. В дальнейшем это позволит оптимизировать коэффициент полезного действия системы при работе с динамически изменяющейся нагрузкой путем введения цепи обратной связи и управлением мощностью излучающего лазера.

3. С использованием исследованного фотоэлектрического преобразователя изготовлен прототип системы мониторинга с энергоснабжением по оптическому волокну. Проведены его испытания в режиме реального времени при работе нескольких функциональных устройств в непрерывном и импульсном режимах. Рассмотрены два варианта энергоснабжения: каждого устройства по отдельной схеме вторичного электропитания и всех вместе по одной схеме. Установлено, что в импульсном режиме потребления энергии экономичнее использовать единую схему питания, которая создает предпосылки для уменьшения передаваемой оптической мощности, при введении системы ее динамической регулировки и системы накопления (буфера) энергии питания удаленных устройств.

4. Анализ электропотребления показал, что наиболее существенные потери энергии происходят в системах охлаждения преобразователей. Целесообразно систему охлаждения лазерного диода изготавливать с использованием элементов Пельтье и вентилятора, а систему охлаждения фотоэлектрического преобразователя — с радиатором и вентилятором или системой тепловых трубок. Для экономии энергии следует использовать вентиляторы с регулируемой скоростью вращения лопастей и изготовить систему терморегуляции с управлением через компьютер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зеневич А. О., Жданович С. В., Новиков Е. В., Матковская Т. А., Коваленко Т. О. Исследование возможности совмещения волоконно-оптической линии связи и системы мониторинга объекта // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 6. С. 406—412.
2. Sun T., Xie X., Wang Z. Wireless power transfer for medical microsystems. N. Y.: Springer, 2013. P. 5—7.
3. Gopinath A. All about transferring power wirelessly // Electronics for You E-zine. 2013. P. 52—56.
4. Agbinya J. I. Wireless power transfer. CRC Press, 2022.
5. Optically Powered Radio-Over-Fiber Systems in Support of 5G Cellular Networks and IoT / M. A. Fahad, J. D. López Cardona, D. S. Montero, C. Vázquez // IEEE Journal of Lightwave Technology. 2021. Vol. 39, N 13.
6. Системы передачи энергии по оптическому волокну / А. А. Гаркушин, В. К. Струк, В. В. Криштон, Е. С. Бойчук, Ю. М. Карпец // Бюл. науч. сообщений: Сб. науч. тр. 2020. Вып. 25, № 25. С. 48—53.
7. Smart Remote Nodes Fed by Power Over Fiber in Internet of Things Applications / J. D. López-Cardona, D. S. Montero, C. Vázquez // IEEE Sensors Journal. 2019. Vol. 19, N 17.
8. Зависимость характеристик системы PoF от расстояния передачи энергии / А. А. Гаркушин, Е. С. Бойчук, И. Р. Дроздов, В. К. Струк, Ю. А. Конин, В. А. Щербаков, В. А. Максименко, В. В. Криштон // Бюл. науч. сообщений: Сб. науч. тр. 2021. Вып. 6, № 6. С. 42—43.

9. Расулев Р. П., Гаркушин А. А., Нифонтова Е. В., Криштон В. В., Вольхин И. Л. Разработка системы мониторинга с энергоснабжением по оптическому волокну // Физика для Пермского края: Сб. 2022. Вып. 15 [Электронный ресурс]: <<http://www.psu.ru/files/docs/science/books/sborniki/fizika-v-permskom-krae2022.pdf>>.
10. Соколовский А. А., Черторийский А. А., Веснин В. Л. Волоконно-оптический датчик напряжения гибридного типа // Радиоэлектронная техника. 2010. № 1. С. 7—12.
11. Бойчук Е. С. и др. Передача энергии лазерным излучением в свободном пространстве // Бюл. науч. сообщений. 2020. № 25. С. 91—102.
12. Chen Y. et al. Optically powered gas monitoring system using single-mode fibre for underground coal mines // Intern. Journal of Coal Science & Technology. 2022. Vol. 9, N 1. P. 26.
13. López-Cardona J. D. et al. Remote optical powering using fiber optics in hazardous environments // Journal of Lightwave Technology. 2018. Vol. 36, N 3. P. 748—754.
14. Rosolem J. B., Roka R. Power-over-fiber applications for telecommunications and for electric utilities // Optical Fiber and Wireless Communications. 2017. Vol. 2. P. 255—278.
15. Haid M. et al. 5 W optical power link with generic voltage output and modulated data signal // Proc. of the 1st Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conf. (OWPT2019). 2019. P. 23—25.
16. Helmers H. et al. 6-W optical power link with integrated optical data transmission // IEEE Trans. on Power Electronics. 2020. Vol. 35, N 8. P. 7904—7909.
17. Cardona J. D. L. et al. Optically feeding 1.75 W with 100 m MMF in efficient C-RAN front-hauls with sleep modes // Journal of Lightwave Technology. 2021. Vol. 39, N 24. P. 7948—7955.
18. МН GoPower: официальный сайт [Электронный ресурс]: <http://www.mhgopower.com/images/PoF%20Sensing%20Platform_Datasheet_Rev_1.5_10-01-2021.pdf>, 15.06.23.
19. Свойства световода, основанные на законах электромагнитного поля [Электронный ресурс]: <<http://foos.sfedu.ru/glava1/1.3.html>>, 15.06.2023.
20. Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co.: официальный сайт [Электронный ресурс]: <https://www.winsensor.com/d/files/PDF/MEMS%20Gas%20Sensor/gm-702b%EF%BC%88ver1_1%EF%BC%89manual.pdf>, 15.06.23.
21. Yang H. et al. 10-W power light co-transmission with optically carried 5G NR signal over standard single-mode fiber // Opt. Letters. 2021. Vol. 46, N 20. P. 5116—5119.
22. Борейшо А. С., Ким А. А., Страхов С. Ю. Ограничения в применении волоконно-оптических технологий для дистанционной передачи энергии // Радиопромышленность. 2017. №. 4. С. 34—41.
23. МН GoPower: официальный сайт [Электронный ресурс]: <http://www.mhgopower.com/images/YCH-N6424_15V_PPC_Datasheet_Rev_3.0_04-29-2022.pdf>, 15.06.23.
24. lenlasers: официальный сайт [Электронный ресурс]: <<https://lenlasers.ru/product/70-vt-976-nm-lazernyj-diod-bwt-s-neskolkimi-izluchatelyami/?ysclid=liwusl8v5w947228029>>, 15.06.23.
25. Fafard S., Masson D. P. 74,7 % Efficient GaAs-Based Laser Power Converters at 808 nm at 150 K // Photonics, MDPI, 2022. Vol. 9, N 8. С. 579.

Алексей Алексеевич Гаркушин

Виктор Владимирович Криштон

Сведения об авторах

- Пермский национальный исследовательский политехнический университет, факультет прикладной математики и механики; ассистент; Пермская научно-производственная приборостроительная компания; заместитель директора научно-образовательного центра; E-mail: garkushin@pnppk.ru
- д-р физ.-мат. наук, профессор; Пермский государственный национальный исследовательский университет, физический факультет; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, факультет прикладной математики и механики; Пермская научно-производственная приборостроительная компания; гл. научный сотрудник; E-mail: Krishtop@pnppk.ru

- Игорь Львович Вольхин** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Пермский государственный национальный исследовательский университет, физический факультет; E-mail: volkhin@psu.ru
- Руслан Павлович Расулев** — студент; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В. И. Ульянова (Ленина), факультет информационно-измерительных и биотехнических систем; Пермская научно-производственная приборостроительная компания; инженер-исследователь; E-mail: rasulev@pnppk.ru
- Елизавета Васильевна Нифонтова** — студент; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, факультет прикладной математики и механики; Пермская научно-производственная приборостроительная компания; инженер-исследователь; E-mail: NifontovaEV@pnppk.ru
- Илья Владиславович Кадочиков** — студент; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, факультет прикладной математики и механики; Пермская научно-производственная приборостроительная компания; инженер-исследователь; E-mail: kadochikov@pnppk.ru
- Виталий Александрович Максименко** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, факультет прикладной математики и механики; E-mail: mva30@mail.ru
- Анатолий Викторович Перминов** — д-р физ.-мат. наук, доцент; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, факультет прикладной математики и механики; заведующий кафедрой; E-mail: perminov1973@mail.ru
- Денис Игоревич Шевцов** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Пермский государственный национальный исследовательский университет, физический факультет; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, факультет прикладной математики и механики; Пермская научно-производственная приборостроительная компания; заместитель директора научно-технического центра; E-mail: shevtsov@pnppk.ru

Поступила в редакцию 18.07.2023; одобрена после рецензирования 28.08.2023; принята к публикации 14.11.2023.

REFERENCES

- Zenevich A.O. et al. *Journal of Instrument Engineering*, 2022, no. 6(65), pp. 406–412. (in Russ.)
- Sun T., Xie X., Wang Z. *Wireless Power Transfer for Medical Microsystems*, NY, Springer, 2013, pp. 5–7.
- Gopinath A. *Electronics for You E-zine*, 2013, pp. 52–56.
- Agbinya J.I. *Wireless Power Transfer*, CRC Press, 2022.
- Fahad Al-Zubaidi, López Cardona J.D., Montero D.S., Vázquez C. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2021, no. 13(39).
- Garkushin A.A., Struk V.K., Krishton V.V., Boychuk E.S., Karpets Yu.M. *Bulletin of Scientific Communications: Collection of Scientific Papers*, 2020, no. 25, pp. 48–53.
- López-Cardona J.D., Montero D.S., Vázquez C. *IEEE Sensors Journal*, 2019, no. 17(19).
- Garkushin A.A., Boychuk E.S., Drozdov I.R., Struk V.K., Konin Yu.A., Shcherbakov V.A., Maksimenko V.V. *Bulletin of Scientific Communications: Collection of Scientific Papers*, 2021, no. 6, pp. 42–43. (in Russ.)
- <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/sborniki/fizika-v-permskom-krae2022.pdf>. (in Russ.)
- Sokolovskiy A.A., Chertoriyskiy A.A., Vesnin V.L. *Radioelektronnaya Tekhnika*, 2010, no. 1, pp. 7–12. (in Russ.)
- Boychuk E.S. *Bulletin of Scientific Communications: Collection of Scientific Papers*, 2020, no. 25, pp. 91–102. (in Russ.)
- Chen Y. et al. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2022, no. 1(9), pp. 26.
- López-Cardona J.D. et al. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, no. 3(36), pp. 748–754.
- Rosolem J.B., Roka R. *Optical Fiber and Wireless Communications*, 2017, vol. 2, pp. 255–278.
- Haid M. et al. *Proceedings of the 1st Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference (OWPT2019)*, 2019, pp. 23–25.
- Helmerts H. et al. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, no. 8(35), pp. 7904–7909.
- Cardona J.D.L. et al. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, no. 24(39), pp. 7948–7955.
- MH GoPower, 2021, http://www.mhgopower.com/images/PoF%20Sensing%20Platform_Datasheet_Rev_1.5_10-01-2021.pdf.
- <http://foos.sfedu.ru/glava1/1.3.html>. (in Russ.)

20. Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., 2003, https://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/MEMS%20Gas%20Sensor/gm-702b%EF%BC%88ver1_1%EF%BC%89manual.pdf.
21. Yang H. et al. *Optics Letters*, 2021, no. 20(46), pp. 5116–5119.
22. Boreysho A.S., Kim A.A., Strakhov S.Yu. *Radio Industry*, 2017, no. 4, pp. 34–41. (in Russ.)
23. http://www.mhgopower.com/images/YCH-H6424_15V_PPC_Datasheet_Rev_3.0_04-29-2022.pdf.
24. <https://lenlasers.ru/product/70-vt-976-nm-lazernyj-diod-bwt-s-neskolkim-izluchatelyami/?ysclid=liwusl8v5w947228029>. (in Russ.)
25. Fafard S., Masson D.P. *Photonics*, MDPI, 2022, no. 8(9), pp. 579.

Data on authors

- | | |
|-------------------------------|---|
| Alexey A. Garkushin | — Perm National Research Polytechnic University, Faculty of Applied Mathematics and Mechanics; Assistant; Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company; Deputy Director of the Scientific and Educational Center; E-mail: garkushin@pnppk.ru |
| Victor V. Krishtop | — Dr. Sci., Professor; Perm State University, Physical Faculty; Perm National Research Polytechnic University, Faculty of Applied Mathematics and Mechanics; Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company; Chief Researcher; E-mail: Krishtop@pnppk.ru |
| Igor L. Volkhin | — PhD, Associate Professor; Perm State University, Physical Faculty; E-mail: garkushin@pnppk.ru |
| Ruslan P. Rasulev | — Student; St. Petersburg Electrotechnical University „LETI“, Faculty of Information, Measuring, and Biotechnical Systems; Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company; Engineer-Researcher; E-mail: rasulev@pnppk.ru |
| Elizaveta V. Nifontova | — Student; Perm National Research Polytechnic University, Faculty of Applied Mathematics and Mechanics; Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company; Engineer-Researcher; E-mail: NifontovaEV@pnppk.ru |
| Ilya V. Kadochikov | — Student; Perm National Research Polytechnic University, Faculty of Applied Mathematics and Mechanics; Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company; Engineer-Researcher; E-mail: kadochikov@pnppk.ru |
| Vitaly A. Maksimenko | — PhD, Associate Professor; Perm National Research Polytechnic University, Faculty of Applied Mathematics and Mechanics; E-mail: mva30@mail.ru |
| Anatoly V. Perminov | — Dr. Sci., Associate Professor; Perm National Research Polytechnic University, Faculty of Applied Mathematics and Mechanics; Head of the Department; E-mail: perminov1973@mail.ru |
| Denis I. Shevtsov | — PhD, Associate Professor; Perm State University, Physical Faculty; Perm National Research Polytechnic University, Faculty of Applied Mathematics and Mechanics, Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company; Deputy Director of the Scientific and Technical Center; E-mail: shevtsov@pnppk.ru |

Received 18.07.2023; approved after reviewing 28.08.2023; accepted for publication 14.11.2023.