

УДК 681.586.5

**Р.Р. Губайдуллин**

Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань, Россия

**РАДИОФОТОННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ  
ТОПЛИВНЫХ ЯЧЕЕК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ  
СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ АДРЕСНЫХ ВОЛОКОННЫХ  
БРЭГГОВСКИХ СТРУКТУР С ДВУМЯ ФАЗОВЫМИ  
 $\pi$ -СДВИГАМИ**

Представлена принципиальная схема устройства контроля температуры топливных ячеек электрических транспортных средств и оптико-электронная схема мультиплексирования чувствительных элементов системы, также была дана оценка применимости адресных волоконных брэгговских структур, работающих на прохождение и отражение для представленной системы.

**Ключевые слова:** волоконная брэгговская решетка, ВБР, датчик температуры, адресные волоконные брэгговские структуры, гибридное транспортное средство, гибридный автомобиль.

**R.R. Gubaidullin**

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI,  
Kazan, Russian Federation

**MICROWAVE-PHOTONIC SYSTEM FOR TEMPERATURE  
FUEL-CELL CONTROL OF ELECTRICAL VEHICLES BASED  
ON ADDRESSED FIBER BRAGG STRUCTURES  
WITH TWO PHASE  $\pi$ -SHIFTS**

The work presents a schematic diagram of a temperature control device for the fuel cells of electric vehicles and an opto-electronic circuit for mulling sensitive elements of the system. An assessment was also made of the applicability of the address fiber Bragg structures working on transmission and reflection for the presented system.

**Keywords:** fiber Bragg grating, FBG, temperature sensor, addressable fiber Bragg structures, hybrid vehicle, hybrid car.

Сегодня ужесточение требований по выбросам продуктов сгорания классических двигателей внутреннего сгорания, связанных с введением все более жестких требований «Евро 6» в Европе и «Евро 5»

в России, вынуждает автопроизводителей все большее внимание уделять альтернативным источникам энергии, таким как водородные топливные ячейки для электротранспортных средств. Однако применение подобных альтернативных источников энергии сопряжено с некоторыми проблемами, связанными с мониторингом состояния, пожаробезопасностью и установкой в транспортном средстве. Данная работа нацелена на решение проблемы контроля состояния ячеек с помощью разработки радиофотонной системы измерения температуры на основе адресных волоконных брэгговских структур (АВБС) [1–4]. В ходе проведения данного исследования в статье был рассмотрен ряд следующих задач: удешевление и упрощение оптоволоконной системы опроса чувствительных элементов системы, мультиплексирование многосенсорной системы измерения, калибровка датчиков измерительной системы и выбор типа АВБС, исходя из удобства применения в блоках топливных ячеек.

Для эффективной и надежной работы система контроля температуры топливных ячеек должна обладать рядом качеств, таких как устойчивость к электромагнитным излучениям (ЭМИ), генерируемым электродвигателем и самими ячейками; возможность организации передачи информации о состоянии ячеек на бортовой компьютер транспортного средства; возможность организации сети датчиков с простой архитектурой; низкая стоимость устройств, опрашивающих оптоволоконные датчики; возможность быстрого и простого монтажа и отсоединения ячеек с температурным датчиком из силовой системы транспортного средства при ремонте и обслуживании; устойчивость оптоволоконного чувствительного элемента и корпуса датчика к длительным тепловым нагрузкам при рабочей температуре от 80 до 130 °С согласно данным таблицы, представленной ниже.

Температурные режимы работы топливных ячеек [5]

Тип топливной ячейки	Химические реагенты	Рабочая температура, °С
Aikaile fuel cell	$H_2 O_2$	90
Proton methanol fuel cell	$H_2 O_2$ Воздух	80
Direct methanol fuel cell	$CH_3 OH O_2$ Воздух	130

Значительную часть представленных задач возможно решить с помощью радиофотонных методов измерения. Так, согласно [6] ВБР маловосприимчивы к ЭМИ. Сегодня технологии передачи информации от ВБР на электронные устройства хорошо изучены и широко применяются в технике [7]. Наиболее распространённым способом опроса и мультиплексации датчиков на основе ВБР является метод спектрального уплотнения каналов (WDM), при котором для опроса датчиков в измерительных устройствах, как правило, применяются сложные и дорогостоящие устройства – интеррогаторы или спектраллизаторы [8]. Для удешевления и упрощения системы мониторинга температуры в данной работе предложено применить АВБС, представленные в работах [9, 10]. К достоинствам чувствительных элементов подобного класса следует отнести простую и дешёвую оптико-электронную схему опроса, где в качестве источника излучения используется широкополосный лазер, а в качестве опрашивающего устройства – фотоприёмники. Это становится возможным благодаря наличию в спектральных характеристиках АВБС разностной частоты, выступающей в качестве уникального адреса для каждого чувствительного элемента [1–3]. Однако наиболее перспективными для разрабатываемой системы являются чувствительные элементы, работающие на прохождение, так, данные чувствительные элементы мультиплексируются параллельным подключением, что упрощает установку температурных датчиков в блок топливных ячеек. Поскольку топливные ячейки, как правило, довольно тонкие, их часто компонуют блоками – по несколько ячеек в блоке. Но в зависимости от способа установки и схемы расположения блоков в транспортном средстве тип АВБС может изменяться. Проанализировав существующие модели электроавтомобилей, можно сделать вывод о том, что большинство автопроизводителей стараются разместить блоки аккумуляторных батарей как можно ниже и как можно больше сосредоточить их массу в центре шасси автомобиля, чтобы обеспечить приемлемое распределение веса автомобиля, что будет препятствием перевороту или развороту транспортного средства в движении. Данное обстоятельство можно считать также справедливым и для электротранспортных средств с топливными ячейками вместо аккумуляторных батарей. Согласно [2] предъявленным требованиям к АВБС соответствуют адресные волоконные брэгговские структуры с двумя фазовыми  $\pi$ -сдвигами. Исходя из ГОСТ 13659–78, верхний ра-

бочий диапазон оптического волокна составляет +300 °С, что полностью удовлетворяет условиям работы представленных типов топливных ячеек.

Согласно [11] адресная волоконная брэгговская структура с двумя фазовыми  $\pi$ -сдвигами ( $2\pi$ -ВБР) по своей сути представляет собой три последовательно расположенные ВБР с двумя  $\pi$ -сдвигами между ними (рис. 1, а), что позволяет генерировать двухчастотное излучение от каждой АВБС при прохождении излучения. В качестве примера подобного излучения на рис. 1, б представлена диаграмма отклика АВБС, полученная в пакете программ Opti Grating.

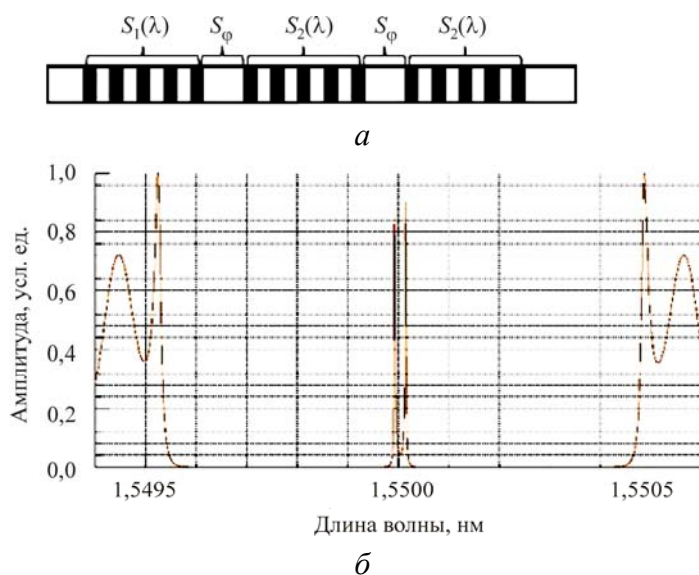


Рис. 1. Адресная волоконная брэгговская структура с двумя фазовыми  $\pi$ -сдвигами ( $2\pi$ -ВБР) [8]: а – схема АВБС, б – спектральный отклик АВБС

Оптико-электронная схема опроса  $2\pi$ -ВБР (рис. 2) основана на принципах радиофотонных измерений и предназначен для анализа излучения от АВБС, где широкополосный лазер 1 генерирует непрерывное излучение (см. рис. 2, а), которое проходит через две АВБС – 3.1-б. В схеме, разделители 2.1-4 распределяют свет источника на все  $2\pi$ -ВБР, а разветвители 2.5-8 передают суммарный отклик от АВБС (см. рис. 2, б) на оптоволоконный разделитель 7, который делит оптический сигнал на каналы: опорный и измерительный. В измерительном канале устанавливается фильтр с линейной амплитудно-частотной ха-

рактеристикой 4, асимметрично изменяющий амплитуды многочастотного излучения (см. рис. 2, *д*), после чего оптический сигнал попадает на измерительный фотодетектор 5 и принимается на аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) 6. В опорном канале сигнал (см. рис. 2, *е*) без изменения мощности поступает на опорный фотоприемник 8 и передается в опорный АЦП 9. Все дальнейшие расчеты ведутся не с абсолютным значением мощности светового потока, а с их отношениями в измерительном и опорном каналах. Данное техническое решение позволяет избавиться от недостатка, связанного с колебаниями мощности светового потока, генерируемого широкополосным лазером.

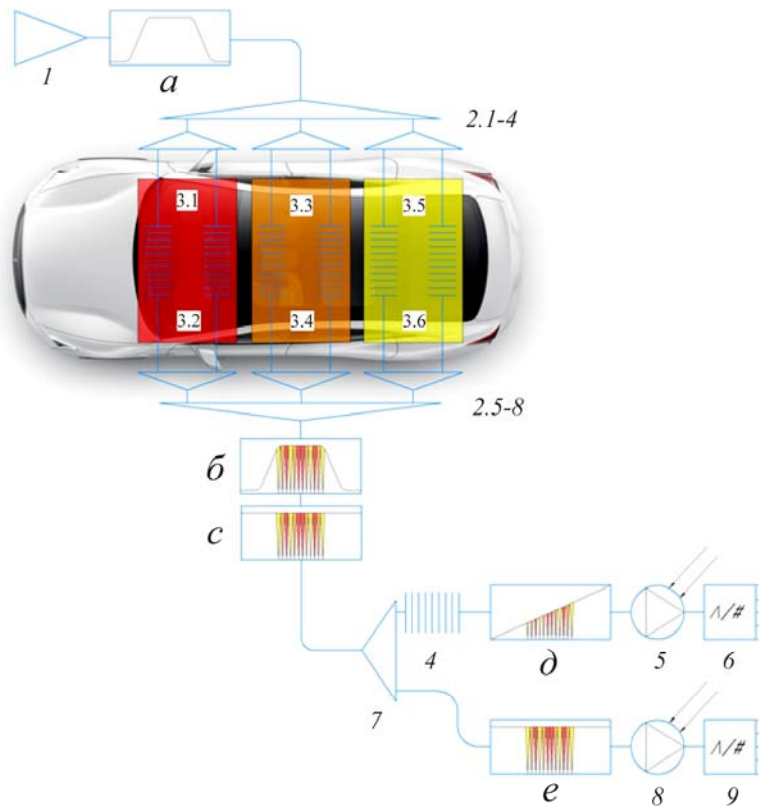


Рис. 2. Оптико-электронная схема опроса измерительной системы: 1 – широкополосный лазер, 2.1-4 – оптические разделители, 2.5-8 – оптический разветвитель, 3.1-6 – 2π-ВБР чувствительные элементы, 4 – наклонный фильтр, 5 – измерительный фотоприемник, 6 – измерительный аналогово-цифровой преобразователь, 7 – оптический делитель, 8 – опорный фотоприемник, 9 – опорный аналогово-цифровой преобразователь

На рис. 3 представлено моделирование соотношений светового потока от АВБС-структур с учетом влияния наклонного фильтра на измерительный канал. Более подробно моделирование оптического отклика АВБС представлено в работах [12, 13]. На основе полученного оптического сигнала было рассчитано соотношение откликов на фотоприемниках, которое затем было подвергнуто быстрому преобразованию Фурье. В результате было получено амплитудно-частотное разложение сигнала на фотоприёмниках (рис. 4), где можно на адресных частотах наблюдать их амплитуды, а также побочные частоты, которые можно исключить из расчета с помощью цифрового фильтра в контроллере системы мониторинга, что становится возможным благодаря постоянности величин адресных частот АВБС.

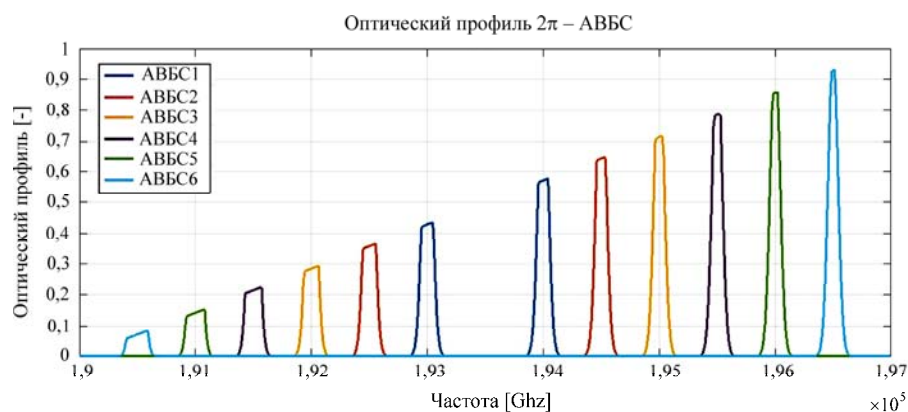


Рис. 3. Соотношение оптических откликов опорного и измерительного каналов системы мониторинга

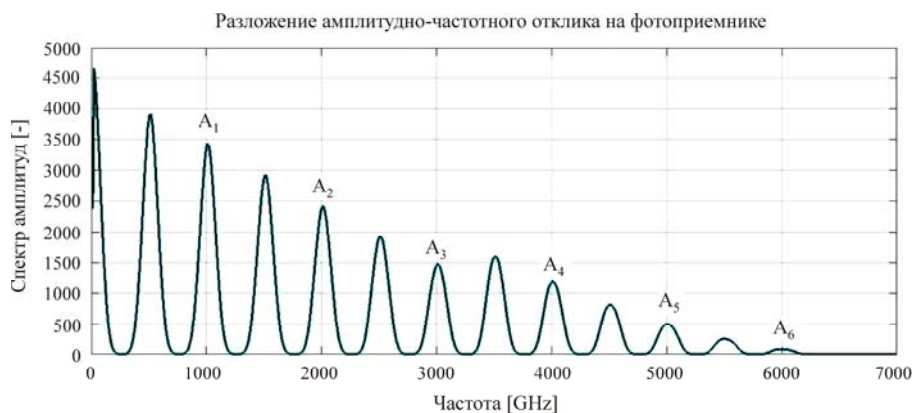


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика соотношений сигналов на опорном и измерительном фотоприемниках, где A1-6 – амплитуды соответствующих АВБС

Зависимость величины амплитуды адресной частоты АВБС будет прямо пропорциональна величине сдвига центральной длины волны АВБС, т.к. в данной модели использовался линейный оптический фильтр. Тогда температуру топливной ячейки в точке установки АВБС датчика можно определить как функцию температуры от смещения центральной длины волны для датчика согласно [14]:

$$T = f(\Delta\lambda_T, c_2, c_1, c_0) = c_2 \cdot (\Delta\lambda_T)^2 + c_1 \cdot \Delta\lambda_T + c_0,$$

где  $\Delta\lambda_T$  – сдвиг центральной длины волны вследствие температурного воздействия;  $c_i$  – калибровочные коэффициенты.

**Выводы по работе.** В ходе проведения работ по разработке радиофотонной системы контроля температур топливных ячеек электротранспортных средств был проделан следующий ряд работ: обосновано использование волоконно-оптических чувствительных элементов, выбран тип чувствительного элемента, предложены схема измерительного устройства и методика калибровки температурных датчиков.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках базовой части государственного задания 8.6872.2017/8.9.*

### Список литературы

1. Методы формирования двухчастотного излучения с разностной частотой, лежащей в терагерцовом диапазоне / Р.А. Хабибуллин, О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2017. – Т. 20, № 3–2. – С. 41–46.

2. Сахабутдинов А.Ж. Адресные волоконные брэгговские структуры на основе двух идентичных сверхузкополосных решеток // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 3. – URL: <http://ivdon.ru/en/magazine/archive/n3y2018/5142>

3. Сахабутдинов А.Ж. Радиофотонные сенсорные системы на адресных волоконных брэгговских структурах и их применение для решения практических задач: дис. ... д-ра техн. наук: 05.11.07. – Казань, 2018. – 467 с.

4. Волоконно-оптическая сенсорная система контроля температуры токоведущих шин / В.А. Иваненко, В.Н. Алексеев, И.А. Лобанов [и др.] // Информационные технологии в электротехнике и электро-

энергетике: материалы XI Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. гос. ун-та им. И.Н. Ульянова. – 2018. – С. 316–320.

5. Fuel Cell Comparison to Alternate Technologies / Julia Kunze-Liebhäuser, PaschosKunze-Liebhäuser, Odysseas Ulrich, Stimming Ulrich // Fuel Cell. – 2013. DOI: 10.1007/978-1-4614-5785-5\_4

6. Biswanath Mukherjee WDM optical communication networks: Progress and challenges // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2000. – Vol. 18, no. 10. – P. 1810–1824.

7. Исследование параметров волоконно-оптической линии передачи / А.В. Бурдин, В.А. Бурдин, А.В. Воронков, Н.А. Шишова; Поволж. гос. акад. телекоммуникаций и информатики. – Самара, 2004. – 65 с.

8. Варжель С.В. Волоконные брэгговские решётки. – СПб.: Изд-во Ун-та ИТМО, 2015. – 65 с.

9. Microwave-Photonic Sensory Tire Control System Based on FBG / R.R. Gubaidullin, T.A. Agliullin, O.G. Morozov, A.Jh. Sahabutdinov, V. Ivanov // Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications – Moscow, 2019.

10. Tire Strain Measurement System Based on Addressed FBG-Structures / R.R. Gubaidullin, T.A. Agliullin, O.G. Morozov, A.Jh. Sahabutdinov, V. Ivanov // Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. – Moscow, 2019.

11. Application of Addressed Fiber Bragg Structures for Measuring Tire Deformation / R.R. Gubaidullin, T.A. Agliullin, O.G. Morozov, A.Jh. Sahabutdinov, V. Ivanov // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). – Yaroslavl, 2019.

12. Аглиуллин Т.А., Губайдуллин Р.Р. Математическое моделирование оптического отклика адресной волоконной брэгговской структуры // III научный форум телекоммуникаций: теория и технологии ТТТ-2019. Оптические технологии в телекоммуникациях ОТТ-2019: материалы XVII Междунар. науч.-техн. конф. – Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2019. – С. 88–90.

13. Губайдуллин Р.Р., Аглиуллин Т.А., Сахабутдинов А.Ж. Математическое моделирование оптического отклика адресной волоконной брэгговской структуры с помощью функции Гаусса // III научный форум телекоммуникаций: теория и технологии ТТТ-2019. Оптические



технологии в телекоммуникациях ОТТ-2019: материалы XVII Междунар. науч.-техн. конф. – Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2019. – С. 204–205.

14. Нуреев И.И. Постановка задач калибровки совмещенных датчиков давления и температуры // *Нелинейный мир*. – 2015. – Т. 13, № 8. – С. 26–31.

### References

1. Khabibullin R.A., Morozov O.G., Sakhabutdinov A.Zh. et al. Methody formirovaniia dvukhchastotnogo izlucheniia s raznostnoi chasto-toi, lezhashchei v teragertsovom diapazone [Methods for the formation of two-frequency radiation with a difference frequency lying in the terahertz range]. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2017, vol. 20, no. 3-2, pp. 41-46.

2. Sakhabutdinov A.Zh. Adresnye volokonnye breggovskie struktury na osnove dvukh identichnykh sverkhuzkopolosnykh reshetok [Addressable fiber Bragg structures based on two identical ultra-narrowband gratings]. *Inzhenernyi vestnik Dona*, 2018, 3, available: <http://ivdon.ru/en/magazine/archive/n3y2018/5142> (accessed: 01 September 2019).

3. Sakhabutdinov A.Zh. Radiofotonnye sensornye sistemy na adresnykh volokonnykh breggovskikh strukturakh i ikh primeneniie dlia resheniia prakticheskikh zadach [Radio-photon sensor systems based on address fiber Bragg structures and their application for solving practical problems]. Doctor's degree dissertation. Kazan, 2018, 467 p.

4. Ivanenko V.A., Alekseev V.N., Lobanov I.A. et al. Volokonno-opticheskaia sensornaia sistema kontrolya temperatury tokovedushchikh shin [Fiber optic sensor system for monitoring the temperature of conductor rails]. *Informatsionnye tekhnologii v elektrotekhnike i elektroenergetike. Materialy XI vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. Cheboksary, Izdatelstvo Chuvashskogo gosudarstvennogo universiteta imeni I.N. Ulianova, 2018, pp. 316-320.

5. Kunze-Liebhäuser J., Kunze-Liebhäuser P., Ulrich O., Stimming U. Fuel cell comparison to alternate technologies. *Fuel Cell*, 2013. DOI: 10.1007/978-1-4614-5785-5\_4

6. Biswanath Mukherjee WDM optical communication networks: Progress and challenges. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, vol. 18, no. 10, pp. 1810-1824.

7. Burdin A.V., Burdin V.A., Voronkov A.V., Shishova N.A. Issledovanie parametrov volokonno-opticheskoi linii peredachi [Fiber optic transmission line parameters research]. Samara, 2004, 65 p.

8. Varzhel S.V. Volokonnye breggovskie reshetki [Fiber Bragg Grids]. Saint Petersburg, Izdatelstvo universiteta ITMO, 2015, 65 p.

9. Gubaidullin R.R., Agliullin T.A., Morozov O.G., Sahabutdinov A.Jh., Ivanov V. Microwave-photonic sensory tire control system based on FBG. *Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. Moscow, 2019.

10. Gubaidullin R.R., Agliullin T.A., Morozov O.G., Sahabutdinov A.Jh., Ivanov V. Tire strain measurement system based on addressed FBG-structures. *Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. Moscow, 2019.

11. Gubaidullin R.R., Agliullin T.A., Morozov O.G., Sahabutdinov A.Jh., Ivanov V. Application of addressed fiber bragg structures for measuring tire deformation. *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*. Yaroslavl, 2019.

12. Agliullin T.A., Gubaidullin R.R. Matematicheskoe modelirovanie opticheskogo otklika adresnoj volokonnoj breggovskoj struktury // III nauchnyj forum telekommunikacii: teoriya i tehnologii TTT-2019. Opticheskie tehnologii v telekommunikacijah OTT-2019: materialy XVII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoi konferencii. Kazan': KNITU-KAI, 2019. S. 88-90.

13. Gubaidullin R.R., Agliullin T.A., Sahabutdinov A.Zh. Matematicheskoe modelirovanie opticheskogo otklika adresnoj volokonnoj breggovskoj struktury s pomoshch'yu funkcii gaussa // III nauchnyj forum telekommunikacii: teoriya i tehnologii TTT-2019. Opticheskie tehnologii v telekommunikacijah OTT-2019: materialy XVII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoi konferencii. Kazan': KNITU-KAI, 2019. S. 204-205.

14. Nureev I.I. Postanovka zadach kalibrovki sovmeshchennykh datchikov davleniia i temperatury [Objectives for the calibration of combined pressure and temperature sensors]. *Nelineinyi mir*, 2015, vol. 13, no. 8, pp. 26-31.

Получено 21.11.19