

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-189-205>

Повышение эффективности измерений концентрации горючих газов термокаталитическим датчиком

О.Г. Бондарь ¹, Е.О. Брежнева ¹ ✉

¹ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: bregnevaeo@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Термокаталитические датчики широко используются в газоаналитических системах и обладают высокими показателями надежности и низкой стоимостью. Однако погрешности измерения концентрации горючих газов, связанные с нелинейностью характеристики преобразования и влиянием колебаний температуры окружающей среды, значительно ограничивают область их применения. Целью исследования является разработка способа измерения концентрации газа термокаталитическими датчиками, позволяющего снизить погрешности измерения за счет отстройки от влияния температуры окружающей среды и линеаризации характеристики преобразования. Задачи исследования: разработать способ температурной стабилизации термокаталитического датчика. Разработать структурно-функциональную схему включения датчика. Получить математическое описание метода и обоснование отстройки от влияния температуры. Экспериментальным путем подтвердить возможность линеаризации функции преобразования датчика в режиме термостабилизации.

Методы. При математическом описании метода использована теория теплообмена и теория электрических цепей с дискретными сигналами. При анализе существующих решений и синтезе устройства использованы методы расчёта цепей с нелинейными элементами и теория измерительных систем. Определение реальной функции преобразования осуществлено экспериментальным методом.

Результаты. Разработан способ измерения концентрации газа термокаталитическим датчиком, реализованный с помощью микроконтроллера и ШИМ, позволяющий снизить погрешности за счет отстройки от влияния температуры окружающей среды. Приведено математическое описание метода. Проведен эксперимент, демонстрирующий эффективность применения температурной стабилизации с целью линеаризации характеристики преобразования.

Заключение. Предложен метод температурной стабилизации термокаталитических датчиков газа, позволяющий повысить точность измерения за счет отстройки от влияния колебаний температуры и линеаризации функции преобразования. Экспериментальным путем подтверждена возможность линеаризации функции датчика, характеризующей зависимость выходного сигнала от концентрации горючего газа. Применение данного метода позволяет снизить стоимость датчика, повысить качественные показатели датчика, такие как надежность и стабильность характеристик.

Ключевые слова: термокаталитический газочувствительный датчик; стабилизация температуры; микроконтроллер; функция преобразования; линеаризация; температура окружающей среды.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

© Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., 2020

Для цитирования: Бондарь О.Г., Брежнева Е.О. Повышение эффективности измерений концентрации горючих газов термокаталитическим датчиком // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(1): 189-205. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-24-1-189-205>.

Поступила в редакцию 10.12.2019

Подписана в печать 15.01.2020

Опубликована 21.02.2020

Improving the Efficiency of Measurements of Combustible Gases Concentration by a Thermocatalytic Sensor

Oleg G. Bondar¹, Ekaterina O. Brezhnev¹ ✉

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: bregnevaeo@mail.ru

Abstract

Thermocatalytic sensors are widely used in gas analysis systems and have high reliability and low cost. However, errors in measuring the concentration of combustible gases related to the non-linearity of the conversion characteristic and the influence of ambient temperature fluctuations significantly limit the scope of their application.

Purpose of research. Development of a method for measuring gas concentration by thermocatalytic sensors, which allows reducing measurement errors by tuning out due to ambient temperature influence and linearization of the conversion characteristic.

Problems. They are as follows: to develop a method for temperature stabilization of a thermocatalytic sensor; to make a structural and functional scheme for the sensor activation; to obtain a mathematical description of the method and substantiation for tuning out as a result of temperature influence; to experimentally confirm the possibility of linearization of the sensor conversion function in the thermal stabilization mode.

Methods. The mathematical description of the method applies the theory of heat transfer and the theory of electrical circuits with discrete signals. When analyzing existing solutions and synthesizing the device, methods for calculating circuits with nonlinear elements and the theory of measurement systems have been used. The real conversion function has been obtained through an experimental method.

Results. A method for measuring gas concentration by a thermocatalytic sensor with the use of a microcontroller and PWM has been developed. It allows reducing errors due to tuning out as a result of ambient temperature influence. A mathematical description of the method has been given. An experiment has been performed. It demonstrates the effectiveness of using temperature stabilization to linearize the conversion characteristic.

Conclusion. The paper proposes a method for temperature stabilization of thermocatalytic gas sensors. The method makes it possible to increase the accuracy of measurements by tuning out due to the influence of temperature fluctuations and linearization of the conversion function. The possibility of linearization of the sensor function has been experimentally confirmed. It characterizes the dependence of the output signal on the concentration of combustible gas. Using this method allows you to reduce the cost of the sensor, improve the quality factors of the sensor, such as the reliability and stability of parameters.

Keywords: thermocatalytic gas-sensitive sensor; temperature stabilization; microcontroller; conversion function; linearization; ambient temperature.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Bondar O. G., Brezhnev E. O. Improving the Efficiency of Measurements of Combustible Gases Concentration by a Thermocatalytic Sensor // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(1): 189-205 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-189-205>.

Received 10.12.2019

Accepted 10.01.2020

Published 21.02.2020

Введение

Для детектирования горючих газов в настоящее время активно применяются термокаталитические датчики, имеющие высокое быстродействие, длительный срок службы и низкую стоимость [1,2]. Погрешности измерения концентрации газов, вызванные низкой селективностью датчиков, чувствительностью к колебаниям температуры окружающей среды, а также нелинейностью характеристики преобразования в значительной степени ограничивают их применение. Проблемы повышения селективности измерений решаются за счет обеспечения оптимальных условий процессов катализа, а также применения методов обработки информации с помощью микроконтроллеров. Отстройка от влияния колебаний температуры окружающей среды, линеаризация характеристик требует модернизации существующих схем включения датчиков.

Материалы и методы

Принцип работы термокаталитического датчика заключается в изменении сопротивления его чувствительного элемента, покрытого слоем катализатора, при протекании реакции горения на его поверхности [3]. Реакция каталитиче-

ского горения сопровождается выделением тепла, что приводит к разогреву элемента. Для компенсации влияния факторов окружающей среды используется дополнительный (компенсационный) элемент, на котором каталитическое горение не происходит вследствие отсутствия катализатора. Элементы датчика помещены в специальные керамические капсулы, которые подогреваются до определенной температуры. Значение температуры подогрева выбирается исходя из типа детектируемого газа для обеспечения селективности каталитической реакции. Оба элемента имеют двойное функциональное назначение, с одной стороны, выполняют роль термометров сопротивления, с другой, – нагревателей. Наиболее распространённой является мостовая схема включения термокаталитических датчиков [3].

В классических мостовых схемах (рис. 1) измеряемым параметром является напряжение ΔU , возникающее в результате разбалансировки моста. Причиной разбалансировки служит изменение сопротивления чувствительного элемента в результате термокаталитической реакции горения, протекающей на его поверхности при появлении детектируемого газа.

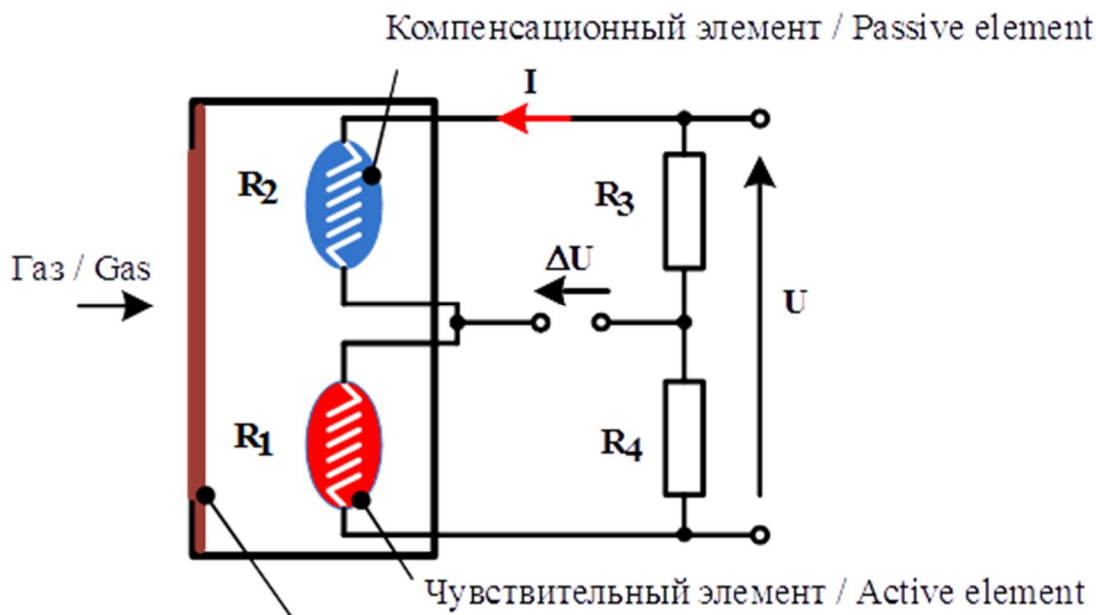


Рис. 1. Типовое включение датчика – мостовая схема

Fig. 1. Typical sensor enable – bridge

Близость расположения элементов датчика, обусловленная конструкцией, приводит к их взаимному разогреву, кроме того, имеет место лишь частичная компенсация влияния колебаний параметров среды, вследствие неравенства температурных коэффициентов [4]. Нелинейность мостовой схемы, изменения температурного коэффициента самих нагревателей и скорости протекания термokatалитической реакции приводят к нелинейности характеристики датчика. Большие концентрации горючих газов приводят к существенному возрастанию температуры чувствительного элемента, что способствует загрязнению поверхности активного элемента продуктами сгорания примесей, её растрескиванию, снижению чувствительности и срока службы датчика. Существует вероятность «горения датчика» при значительных концентрациях го-

рючего газа, проявляющаяся в саморазогреве после при снятии напряжения питания, что приводит к спеканию датчика и его отказу [5,6].

Учитывая вышесказанное, основной целью работы являлась разработка способа измерения концентрации газа термokatалитическим датчиком, позволяющего уменьшить погрешности, связанные с колебаниями температуры окружающей среды и определением приращения мощности, за счёт термokatалитической реакции.

Анализ проблемы снижения погрешности измерений термokatалитическими датчиками показал, что основным методом ослабления вышеобозначенных эффектов является поддержание постоянной температуры чувствительного элемента [7,8,9,10,11,12,13,14, 15]. При адсорбции горючего газа на чувствительном элементе растёт его темпе-

ратура, а, следовательно, и сопротивление нагревателя. Стабилизация температуры реализуется цепью обратной связи, которая отслеживает изменение падения напряжения на нагревателе и уменьшает мощность, подаваемую на датчик. Предложенный способ позволяет осуществить линеаризацию функции преобразования датчика и увеличить срок службы за счет исключения выгорания датчика и спекания катализатора. Существуют различные варианты реализации метода температурной стабилизации [6,15,16]. Для реализации изотермического режима работы датчика наиболее перспективным является применение микроконтроллера [17].

Применение параллельных или последовательных линейных регуляторов мощности подогрева неэффективно из-за их низкого коэффициента полезного действия. Альтернативой подобного подхода является применение импульсных регуляторов. Возможные варианты решения базируются на управлении средним значением подводимой мощности изменением частоты или длительности импульсов тока или напряжения.

Для целей управления рабочей температурой нагревателей каталитических датчиков целесообразным является вариант изменения длительности электрических импульсов с фиксированной частотой повторения, так называемая широтно-импульсная модуляция ШИМ. Это обусловлено необходимостью минимизации колебаний температуры при включении и выключении тока, проте-

кающего через нагреватели каталитических датчиков. Стабильность периода повторения позволяет выбором достаточно высокой частоты ШИМ обеспечить эту стабильность. В [5] для этих целей используется управляемый напряжением ШИМ-генератор тока стабильной амплитуды с изменяемой длительностью импульса $t_{\text{и}}$ и фиксированным периодом повторения T . Подобные генераторы базируются на сравнении напряжения пилообразной формы с постоянным управляющим напряжением. Компаратор, на входах которого осуществляется сравнение этих напряжений, формирует на выходе напряжение высокого или низкого уровня в зависимости от того, какое из напряжений в данный момент времени больше. Его выходной сигнал включает или выключает генератор стабильного тока. Управляющий сигнал обратной связи формируется из падения напряжения на нагревателе. Протекающий через него ток создаёт на нагревателе напряжение с амплитудой, пропорциональной величине сопротивления. В паузе это напряжение равно нулю, а поэтому для формирования управляющего ШИМ-генератором напряжения необходимо применять амплитудный детектор. Рассеиваемая нагревателем электрическая мощность определяется амплитудой падения напряжения на нём и коэффициентом заполнения $t_{\text{и}}/T$. При каталитическом окислении горючего газа дополнительная мощность повышает темпе-

ратуру нагревателя и его сопротивление. При этом возрастающее напряжение обратной связи уменьшает коэффициент заполнения ШИМ и электрическую мощность, рассеиваемую нагревателем. Это уменьшение мощности соответствует увеличению мощности за счёт реакции каталитического окисления и, следовательно, концентрации газа. Таким образом, для определения приращения мощности, выделяющейся на чувствительном элементе датчика за счёт реакции каталитического окисления, необходимо из импульсного напряжения на нагревателе чувствительного элемента сформировать напряжение, пропорциональное среднему значению мощности.

При изменении температуры окружающей среды будет изменяться электрическая мощность, подводимая к нагревателю чувствительного элемента датчика, что будет приводить к изменению выходных показаний датчика при отсутствии изменения концентрации горючего газа. Кроме того, имеется источник погрешности, связанный с выделением из последовательности прямоугольных импульсов действующего значения напряжения, преобразованием его в значение мощности рассеиваемой нагревателем датчика и определением её приращения за счёт термокаталитической реакции. Учитывая вышесказанное, недостатком данного решения является влияние температуры окружающей среды на показания датчика.

Способ температурной стабилизации и его математическое обоснование

Преимущества изотермического метода измерения заставляют искать способы борьбы с его недостатками. Эффективным способом, позволяющим устранить недостатки как типового мостового включения датчика, так и рассмотренных выше вариантов, является способ реализации изотермического режима одновременно чувствительного и компенсирующего элементов датчика [6].

Это требует двух управляемых ШИМ-генераторов, стабилизирующих температуру чувствительного и компенсационного элементов. Один ШИМ-генератор определяет ток чувствительного элемента, а второй – компенсационного. ШИМ-генераторы подключают нагреватели чувствительного и компенсационного элементов к стабилизированному источнику напряжения. По сути ШИМ-генератор является в этом случае силовым ключом, управляемым широтно-модулированными импульсами. При этом для стабилизации протекающего через нагреватели тока, последовательно с каждым из них подключается опорный резистор. Амплитуда падения напряжения на опорном резисторе стабилизируется собственной цепью обратной связи за счёт изменения коэффициента заполнения t_H/T отдельно для каждого ШИМ-генератора. Изменение среднего значения мощности нагревателей приводит к изменению их сопротивлений. Поэтому стабилизация амплитуды напряжения на опорном ре-

зисторе эквивалентна поддержанию фиксированного отношения сопротивления нагревателя к сопротивлению опорного резистора. Для исключения влияния неидентичности опорных резисторов на результаты измерения целесообразно использовать единственный общий опорный резистор.

Такой подход предъявляет дополнительные требования к ШИМ-генераторам и построению цепей обратной связи, обеспечивающих раздельное регулирование температур элементов датчика.

Во-первых, требуется исключить интермодуляцию прямоугольных импульсов двух генераторов (полное или частичное наложение импульсов). Для этого требуется обеспечить одинаковый период повторения T широтно-модулированных импульсов, сдвиг фаз импульсов $t_{\text{и}}$ и максимальную длительность не более $T/2$ для исключения их перекрытия.

Во-вторых, требуется применить синхронное с ШИМ амплитудное детектирование для выделения двух управляющих сигналов обратной связи.

Данные требования проще всего удовлетворить с использованием аппаратно-программных средств микроконтроллеров [6]. При этом аппаратные средства в виде таймеров позволяют программным способом управлять коэффициентами заполнения $K_{\text{зч}} = t_{\text{ч}}/T$ – широтно-модулированных импульсов, подогревающих чувствительный элемент и $K_{\text{зк}} = t_{\text{к}}/T$ – подогревающих компенсационный элемент. Обратная связь реализуется с помощью компарато-

ра, сравнивающего напряжение на опорном резисторе с некоторым фиксированным напряжением, определяющим номинальный ток подогрева, или измерением напряжения на нём встроенным АЦП, с последующим сравнением с цифровым кодом, соответствующим номинальному току подогрева. Результаты сравнения считываются в моменты появления импульсов подогрева чувствительного элемента $t_{\text{ч}}$, или компенсационного элемента $t_{\text{к}}$. На основании сравнения принимается решение о программном уменьшении или увеличении соответствующей длительности импульса.

Измеряемую концентрацию analyта определяют из выражения

$$C_{\text{х}} = C_0((t_{\text{ч0Т}} - t_{\text{ч}}) - C_1(t_{\text{к0Т}} - t_{\text{к}})),$$

в котором константа C_0 , определяется во время калибровки на смеси газов с известной концентрацией analyта, константы $t_{\text{ч0Т}}$, $t_{\text{к0Т}}$, являющиеся длительностями импульсов программно управляемых ШИМ-генераторов, определяются в момент калибровки при некоторой температуре окружающей среды $T_{\text{с1}}$ (её точное значение не используется) в отсутствие analyта, длительности импульсов $t_{\text{ч}}$ и $t_{\text{к}}$, программно управляемых ШИМ-генераторов определяются также в отсутствие analyта при другой температуре окружающей среды $T_{\text{с2}}$, существенно отличающейся от $T_{\text{с1}}$ (её точное значение не используется), а константа C_1 определяется как

$$C_1 = \frac{t_{\text{ч0Т}} - t_{\text{ч}}}{t_{\text{к0Т}} - t_{\text{к}}}.$$

Константы $t_{\text{ч0T}}$, $t_{\text{к0T}}$, C_1 , C_0 – являются калибруемыми величинами. При этом только константа C_0 , определяющая чувствительность, калибруется по смеси газов с известной концентрацией аналита. Остальные константы, зависящие от неидентичности чувствительного и компенсационного элементов термодаталитического датчика и отклонения от расчётных значений параметров измерительной схемы, определяются в отсутствие аналита.

Уравнение теплового баланса для чувствительного и компенсационного элементов датчика в установившемся режиме при питании их прямоугольными импульсами тока и стабилизированных амплитудах падений напряжений них [6,18,19]:

$$P_{\text{ч}} + P_{\text{X}} = U_{\text{ч}} I_{\text{ч}} + P_{\text{X}} = \frac{U_{\text{ч}}^2}{R_{\text{ч}}} + P_{\text{X}} =$$

$$= I_{\text{ч}}^2 R_{\text{ч}} + P_{\text{X}} = \delta_{\text{Тч}} (T_{\text{ч}} - T_{\text{С}}); \quad (1)$$

$$P_{\text{К}} = U_{\text{К}} I_{\text{К}} = \frac{U_{\text{К}}^2}{R_{\text{К}}} = I_{\text{К}}^2 R_{\text{К}} =$$

$$= \delta_{\text{ТК}} (T_{\text{К}} - T_{\text{С}}), \quad (2)$$

где $P_{\text{ч}}$, $P_{\text{К}}$ – средние значения электрических мощностей за период ШИМ, выделяющихся на чувствительном и компенсационном элементах термодаталитического датчика (далее датчика); P_{X} – дополнительная мощность, выделяющаяся на чувствительном элементе датчика за счёт химической реакции термодаталитического окисления аналита, $R_{\text{ч}}$, $R_{\text{К}}$ – сопротивления нагревателей чувствительного и компенсационного элемента датчика, соответственно;

$U_{\text{ч}}$, $I_{\text{ч}}$, $U_{\text{К}}$, $I_{\text{К}}$ – действующие значения напряжений и токов, чувствительного и компенсационного элементов датчика; $T_{\text{ч}}$, $T_{\text{К}}$, $T_{\text{С}}$ – температура чувствительного, компенсационного элементов датчика и окружающей среды, соответственно; $\delta_{\text{Тч}}$ – коэффициент теплоотдачи чувствительного элемента датчика; $\delta_{\text{ТК}}$ – коэффициент теплоотдачи компенсационного элемента датчика в общем случае отличающиеся из-за невозможности точно выдержать одинаковыми геометрию элементов и состав материалов.

Исключив из выражений (1), (2) температуру среды и проведя ряд преобразований определим мощность, выделяемую за счёт химической реакции:

$$P_{\text{X}} = \left(P_{\text{ч0}} - \frac{\delta_{\text{Тч}}}{\delta_{\text{ТК}}} P_{\text{К0}} \right) - \left(P_{\text{ч}} - \frac{\delta_{\text{Тч}}}{\delta_{\text{ТК}}} P_{\text{К}} \right). \quad (3)$$

Среднее значение мощности, выделяющейся при широтно-импульсной модуляции (ШИМ) равно максимальному значению мгновенной мощности, умноженной на коэффициент заполнения $K_{\text{з}}$, равный отношению длительности импульса к периоду ШИМ.

Максимальные значения мгновенных мощностей, выделяющиеся при протекании тока через нагреватель чувствительного и компенсационного элементов определяются через амплитудные значения напряжений и токов нагревателей, и равны, т.к. амплитудные значения напряжения на элементах стабилизируются и их целесообразно выбирать одинаковыми для взаимной компенсации ошибок системы стабилизации температур:

$$P_M = P_{\text{ЧМ}} = U_{\text{ЧМ}} I_{\text{ЧМ}} = P_{\text{КМ}} = \\ = U_{\text{КМ}} I_{\text{КМ}} = U_{\text{ЧМ}} \frac{U_{0\text{М}}}{R_0} = U_{\text{КМ}} \frac{U_{0\text{М}}}{R_0}, \quad (4)$$

где $U_{\text{ЧМ}} = U_{\text{КМ}}$, $I_{\text{ЧМ}} = I_{\text{КМ}} = I_{0\text{М}}$ – амплитуды напряжений и токов чувствительного и компенсационного элементов, соответственно; $I_{0\text{М}}$ – амплитуда тока, протекающего через опорный резистор, под-

ключаемый поочерёдно последовательно с чувствительным или опорным элементом; $U_{0\text{М}}$, R_0 – амплитуда напряжения на опорном резисторе и величина сопротивления опорного резистора, соответственно. $U_{0\text{М}}$, R_0 – постоянные величины для конкретного газоанализатора.

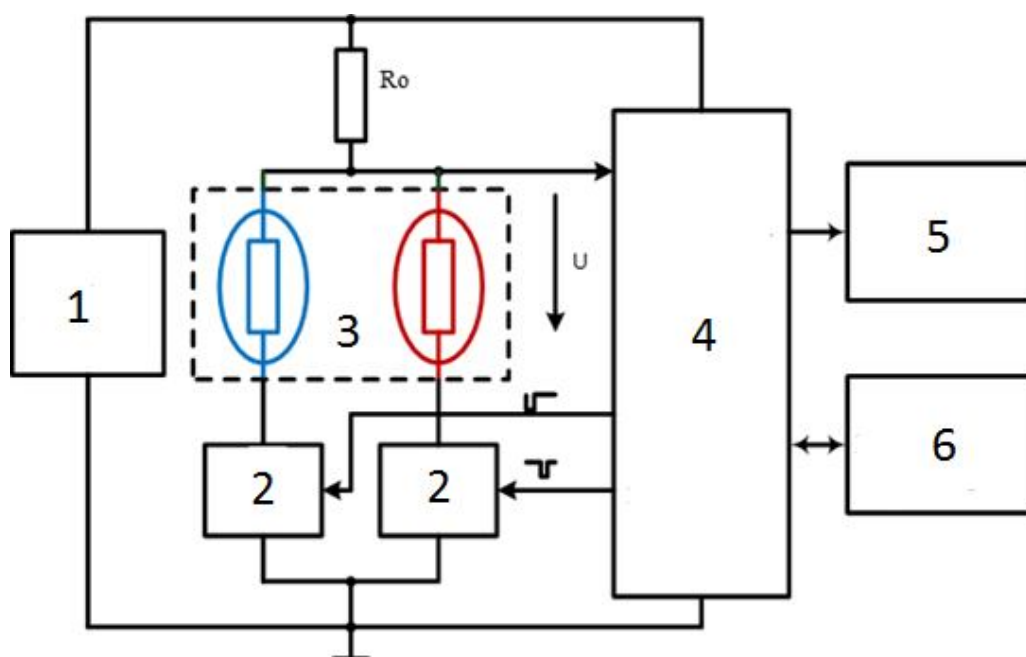


Рис. 2. Структурная схема устройства стабилизации термокаталитического датчика: 1 – источник стабильного напряжения; 2 – ключ; 3 – датчик; 4 – микроконтроллер; 5 – устройство индикации; 6 – интерфейсный адаптер

Fig. 2. Block diagram of a device for stabilizing a thermocatalytic sensor: 1 – stable voltage source; 2 – key; 3 – sensor; 4 – microcontroller; 5 – indicating device; 6 – interface adapter

Максимальное значение мгновенной мощности P_M является константой в данном способе измерения концентрации аналита и определяется выбранным напряжением питания ШИМ генераторов поочерёдно генерирующих импульсы тока в чувствительном и компенсационном элементах датчика, протекающие через общий опорный резистор, величиной сопротивления опорного ре-

зистора, и номинальной рассеиваемой мощностью на элементе датчика (значение, заданное производителем датчика).

Среднее за период ШИМ значение мощности определяется соответствующим коэффициентом заполнения:

$$P_{\text{Ч}} = P_M K_{\text{ЗЧ}}, P_{\text{К}} = P_M K_{\text{ЗК}}, P_{\text{Ч0}} = \\ = P_M K_{\text{ЗЧ0}}, P_{\text{К0}} = P_M K_{\text{ЗК0}} = P_M, \quad (5)$$

где $K_{\text{ЗЧ}}$, $K_{\text{ЗЧ0}}$ – коэффициенты заполнения для чувствительного элемента в ра-

бочем режиме и режиме калибровки (измерения без аналита); $K_{3к}$, $K_{3к0}$ – коэффициенты заполнения для компенсационного элемента в рабочем режиме и режиме калибровки.

Выражая в (3) средние значения мощностей через максимальное значение мгновенной мощности и соответствующие коэффициенты заполнения, получим:

$$P_X = P_M \left(\left(K_{3ч0} - \frac{\delta_{ТЧ}}{\delta_{ТК}} K_{3к0} \right) - \left(K_{3ч} - \frac{\delta_{ТЧ}}{\delta_{ТК}} K_{3к} \right) \right). \quad (6)$$

С учётом того, что коэффициенты заполнения выражаются через соответствующие длительности широтно-модулированных импульсов - t , и период ШИМ колебаний - T , а концентрация аналита связана прямо-пропорциональной зависимостью с мощностью, выделяемой при термокаталитической реакции окисления P_X , при замене отношения коэффициентов теплоотдачи константой C_1 , получим выражение для концентрации аналита:

$$C_X = C \frac{P_M}{T} ((t_{ч0} - C_1 t_{к0}) - (t_ч - C_1 t_к)), \quad (7)$$

где $t_{ч0}$, $t_{к0}$, $t_ч$, $t_к$ – длительности импульсов подогрева чувствительного и компенсационного элементов, соответственно, при калибровке в отсутствии аналита и в рабочих условиях; C – коэффициент.

Заменяя постоянный множитель перед скобкой калибруемой константой C_0 и перегруппируя переменные, получим:

$$C_X = C_0 ((t_{ч0} - t_ч) - C_1 (t_{к0} - t_к)). \quad (8)$$

Определение констант C_0 , C_1 , $t_{ч0}$, $t_{к0}$ осуществляется при калибровке.

Для повышения точности целесообразно осуществлять усреднение длительностей ШИМ импульсов за достаточно большое целое число периодов (более 100). Частота ШИМ импульсов выбирается исходя из минимального изменения сопротивления нагревателей за период ШИМ (допускаются изменения меньше 0,1%), поэтому период ШИМ редко превышает единицы миллисекунд, а потому за время усреднения, сравнимое с временем отклика типичного датчика на скачкообразное изменение концентрации аналита, число периодов ШИМ достигает единиц тысяч.

При измерении предложенным способом информативными параметрами по которым определяется концентрация аналита являются лишь длительности импульсов подогрева чувствительного и компенсационного элементов датчика [6]. Не требуется измерения температур окружающей среды и знаний истинных температур элементов датчика ни в процессе калибровки, ни в процессе измерения концентрации аналита.

При применении программно управляемых ШИМ генераторов (на основе, например, таймеров, встроенных в микроконтроллеры), длительности импульсов в установившемся режиме являются известными программно регулируемыми величинами, обеспечивающими поддержание постоянной температуры чувствительного и компенсационного элементов датчика и непосред-

ственно определяют электрические мощности, выделяющиеся на нагревателях чувствительного и компенсационного элементов [20]. Поэтому никаких измерений электрической мощности, ухудшающих точность измерения, проводить не надо. Амплитуды падений напряжения на чувствительном и компенсационном элементах могут отклоняться от расчётного значения, но должна быть обеспечена их стабильность.

Простейший способ стабилизации напряжения на чувствительном и компенсационном элементах – это увеличение длительности соответствующего ШИМ-импульса на минимальный шаг приращения, если напряжение меньше заданного значения, и уменьшение в противоположной ситуации. Устойчивость системы регулирования достигается благодаря тому, что постоянные времени нагрева и охлаждения (инерционность тепловых процессов) существенно превышают период ШИМ, что обеспечивается выбором периода ШИМ.

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 показана временная диаграмма управляющих ключами импульсов ШИМ-генераторов. Факторами, повышающими точность устройства, являются использование единого опорного резистора и общего для двух элементов датчика уровня стабилизируемого напряжения, что позволяет исключить погрешность, возникающую в контуре стабилизации в случае различных уровней. Данный способ измерения позво-

ляет исключить влияние на точность измерений дополнительных факторов, связанных с проблемами технологического характера, таких как различие температур и коэффициентов теплопроводности чувствительного и компенсационного элементов.

На разработанном прототипном модуле с термокаталитическим датчиком водорода *NP-AHS* фирмы *Nemoto* экспериментальным путем была получена функция преобразования датчика, работающего в режиме температурной стабилизации (рис. 4). Статическим объёмным методом при нормальных условиях ($RH=65\%$, $T=25^{\circ}\text{C}$ $P=101,3$ кПа) готовились газовые смеси (водород / воздух) с содержанием водорода от 0 до 5% об. с шагом 0,2% об.

В основу прототипного модуля положен микроконтроллер на ядре AVR фирмы *Microchip*. Достоинство этого микроконтроллера состоит в высокой производительности (16-20 MIPS), развитой периферии, наличии дешёвых программаторов, бесплатных сред разработки программного обеспечения.

Ключи генераторов тока построены на полевых транзисторах с малым сопротивлением открытого канала. Схемы управления ключами содержат ёмкостную развязку для исключения аварийных ситуаций, приводящих к появлению на зажимах постоянных напряжений, открывающих ключи на длительные интервалы времени и выводящих из строя нагреватели элементов датчика.

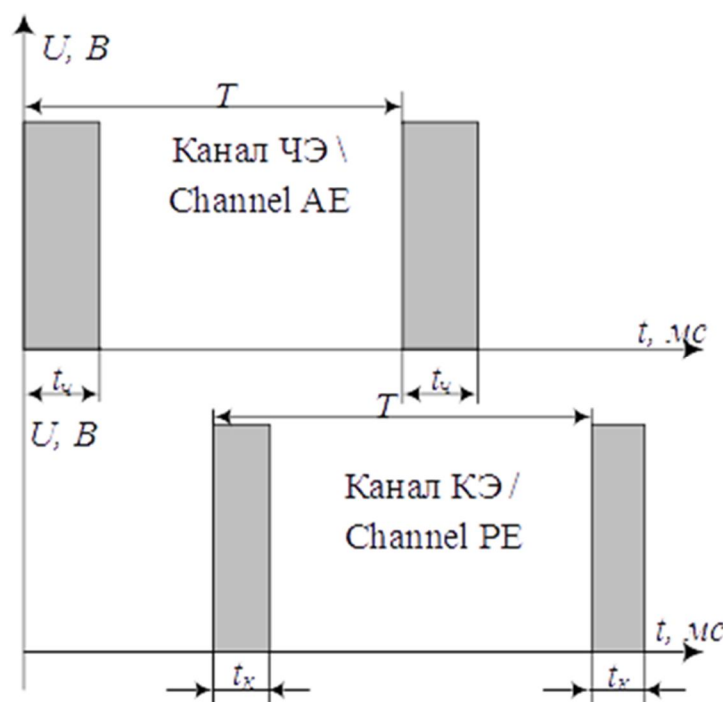


Рис. 3. Временная диаграмма управляющих импульсов ШИМ генераторов:
ЧЭ – чувствительный элемент; КЭ – компенсационный элемент

Fig. 3. Timing diagram of the control pulses of *PWM* generators: t_A – active element time, t_P – passive element time; *AE* – active element; *PE* – passive element

При этом схема фиксации уровня исключает изменение амплитуды открывающих импульсов при изменении коэффициента заполнения широтно-модулированных импульсов.

В табл. 1 приведены основные технические параметры. Для получения максимальной чувствительности сопротивление компенсационного элемента

R_K было выбрано равным сопротивлению чувствительного элемента $R_{\text{ч}}$.

Учитывая, что $R_{\text{ч}}$ и R_K образуют делитель, определялась амплитуда тока:

$$I = \frac{E_{\text{п}}}{R_{\text{ч}} + R_K} = 0,45 \text{ A.}$$

Коэффициент заполнения рассчитывался как соотношение номинальной $P_{\text{н}}$ и мгновенных P мощностей в отсутствие определяемого газа.

Таблица 1. Основные технические параметры

Table 1. Main technical parameters

$R_K, \text{ Ом} /$ $R_{\text{PE}}, \text{ Ом}$	$R_{\text{ч}}, \text{ Ом} /$ $R_{\text{AE}}, \text{ Ом}$	$I_{\text{п}}, \text{ А} /$ $I_s, \text{ А}$	$P, \text{ Вт} /$ $P, \text{ Вт}$	$P_{\text{н}}, \text{ Вт} /$ $P_{\text{н}}, \text{ Вт}$	$K_3, \text{ Вт} /$ $K_{\text{ф}}, \text{ Вт}$	$E_{\text{п}}, \text{ В} /$ $E_s, \text{ В}$
5,5	5,5	0,45	2,25	0,232	0,103	5

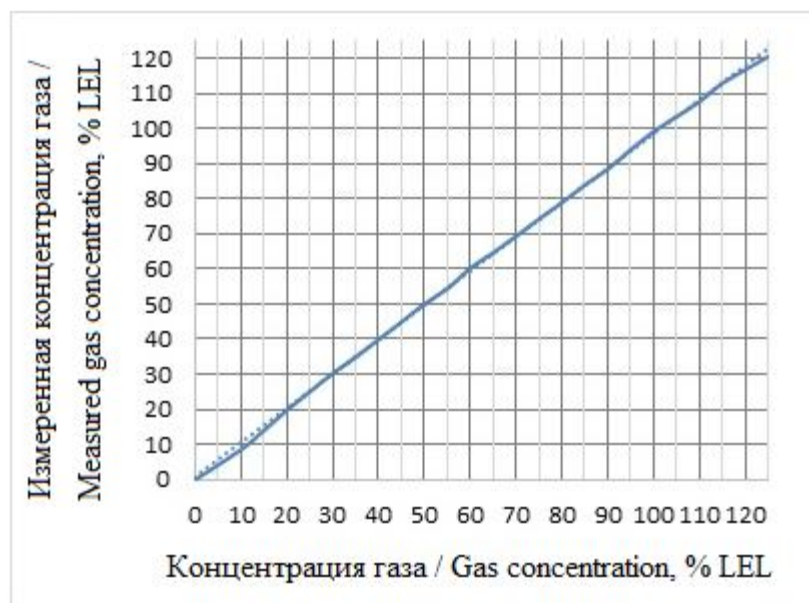


Рис. 4. Функция преобразования модуля с датчиком, работающим в изотермическом режиме

Fig. 4. Conversion function of a module with a sensor operating in isothermal mode

Ранее численным методом была проведена оценка нелинейности функции преобразования термокatalитического датчика, работающего в стандартной схеме включения. Проведенные расчеты и анализ позволили получить теоретическую оценку нелинейности характеристики преобразования для предложенного метода на уровне 1%, против 27% в мостовой схеме включения. На основании полученных результатов были сделаны выводы о доминирующем вкладе в нелинейность характеристики преобразования мостовой схемы включения датчика. Предполагалось, что источниками остаточной нелинейности мостовой схемы могут служить зависимости скорости реакции и условий теплоотдачи элементов датчика от температуры активного элемента.

Выводы

Предложен метод температурной стабилизации термокatalитических датчиков газа, позволяющий повысить точность измерения за счет отстройки от влияния колебаний параметров среды, неидентичности элементов датчика и линеаризации функции преобразования. Получено математическое описание работы датчика в режиме термостабилизации. Проведена оценка нелинейности функции преобразования для датчиков, имеющих классическую схему включения. Экспериментальным путем подтверждена возможность линеаризации функции датчика, характеризующей зависимость выходного сигнала от концентрации горючего газа. Применение данного метода позволяет снизить стоимость датчика, повысить качественные показатели датчика, такие как надежность и стабильность характеристик.

Список литературы

1. Chansin G., Pugh D. Environmental gas sensors 2017–2027. Cambridge, UK: CISION, 2017. 166 p.
2. Somov A., Baranov A., Spirjakin D. A wireless sensor-actuator system for hazardous gases detection and control // Sensors and Actuators A: Physical. 2014. Vol. 210. P.157-164.
3. Дрейзин В. Э., Брежнева Е.О., Бондарь О. Г. Моделирование каталитического датчика водорода // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. Ч. 1. № 5(38). С. 69-76.
4. Developments in gas sensor technology for hydrogen safety / T. Hübert, L. Boon-Brett, V. Palmisano, M. A. Bader // Int. J. Hydrogen Energy. 2014. Vol. 39. P. 20474-20483.
5. Пат. РФ № 2304278, G01N27/12 «Способ стабилизации параметров микронагревателя измерительного элемента газового датчика и устройство для его осуществления», 10.08.2007, Бюл. № 22.
6. Пат. РФ № 2698936. Российская Федерация, МПК G01N 27/12 (2006.01), H03K 3/72 (2006.01). Способ измерения концентрации газа каталитическим датчиком / Бондарь О.Г., Брежнева Е.О. № 2018147099; заявл. 28.12.2018; опубл. 02.09.2019, Бюл. № 25. 1 с.
7. Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., Полякова А.В. Применение микроконтроллера для температурной стабилизации полупроводниковых газочувствительных датчиков // Датчики и системы 2014. №2. С. 41-46.
8. Energy efficient planar catalytic sensor for methane measurement / E. E. Karpov, E. F. Karpov, A. Suchkov, S. Mironov, A. Baranov, V. Sleptsov, L. Calliari // Sensors and Actuators A: Physical. 2013. Vol. 194. P. 176–180.
9. Increase of catalytic sensors stability / E. Karpova, S. Mironov, A. Suchkov, A. Karelin, E. E. Karpov, E. F. Karpov // Sensors and Actuators B: Chemical. 5 July 2014. Vol. 197. P. 358-363.
10. Improving interoperability of catalytic sensors / A. Somov, A. Baranov, Alexey Suchkov, A. Karelin, S. Mironov, E. Karpova // Sensors and Actuators B: Chemical. December 2015. Vol. 221, 31 P. 1156-1161. ISSN 0925-4005
11. Wireless multi-sensor gas platform for environmental monitoring / D. Spirjakin, A. Baranov, A. Karelin, A. Somov // Environmental, Energy and Structural Monitoring Systems (EESMS), 2015 IEEE Workshop on, 10 July 2015. P. 232-237.
12. Energy efficient planar catalytic sensor for methane measurement / E. F. Karpov, E. E. Karpov, A. Suchkov, S. Mironov, A. Baranov, V. Sleptsov, L. Calliari // Sensors and Actuators A: Physical. May 2013. Vol.194. P. 176-180.

13. Абдурахманов Э. А., Рузиев Э. А. Селективные термokatалитические сенсоры в экологическом мониторинге газообразных выбросов // Химическая промышленность. 2003. Т. 80. № 9. С. 444-449.
14. Mao S., Lu G., Chen J. Nanocarbon-based gas sensors: progress and challenges // J. Mater. Chem. A. 2014. Vol. 2. P. 5573-5579.
15. Пат. РФ № 2544358. Российская Федерация, МПК G01N 27/18 (2006.01). Способ измерения до взрывных концентраций горючих газов в воздухе / Карпова Е. Е., Миронов С.М., Сучков А.А., Карпов Е.Е., Карпов Е.Ф. № 2013130480/28; заявл. 04.07.2013; опубл. 20.03.2015, Бюл. № 8. 1 с.
16. Пат. РФ № 2623828. Российская Федерация, МПК G01N 27/16 (2006.01), G01N 25/22 (2006.01), Способ измерения концентрации горючих газов и паров в воздухе термokatалитическим сенсором диффузионного типа / Карпова Е. Е., Миронов С.М., Сучков А.А., Карпов Е.Е., Карпов Е.Ф. № 2013130480/28; заявл. 04.07.2013; опубл. 20.03.2015, Бюл. № 8. 1 с.
17. Kolmakov A., Sysoev V. V. Analyte multi-sensor for the detection and identification of analyte and a method of using the same. Патент США US8443647. Опубл. 21.05.2013.
18. Hydrogen sensors – A review// Sensors and Actuators B / T. Hubert, L. Boon-Brett, G. Black, U. Banacha // Chemical. 2011. P. 329-352
19. Applying Catalytic Sensor in Non-volatile Wireless Sensor Networks / A. Karelin, E.E. Karpov, E.F. Karpov, S Mironov., A. Baranov, V. Sleptsov, K. Napolsky // Procedia Engineering. 2015. Vol. 120. P. 1019-1023.
20. Macias M. M. Gas sensor measurements during the initial action period of duty cycling for power saving // Sensors and Actuators B. 2017. Vol. 239. P. 1003-1009.

References

1. Chansin G., Pugh D. Environmental gas sensors 2017–2027. Cambridge, UK, CISION Publ., 2017. 166 p.
2. Somov A., Baranov A., Spirjakin D. A wireless sensor-actuator system for hazardous gases detection and control. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, vol. 210, pp. 157-164.
3. Dreyzin V. E., Brezhnev E. O., Bondar O. G. Modelirovanie kataliticheskogo datchika vodoroda [Modeling of catalytic hydrogen sensor]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2011, pt. 1, no. 5 (38), pp. 69-76 (In Russ.).
4. Hübert T., BoonBrett L., Palmisano V., Bader M. A. Developments in gas sensor technology for hydrogen safety. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2014, vol. 39, pp. 20474-20483.
5. *Sposob stabilizatsii parametrov mikronagrevatelya izmeritel'nogo elementa gazovogo datchika i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method for stabilizing the parameters of

the microheater of the gas sensor measuring element and a device for its implementation"]. Patent RF, no. 2304278, G01N27. 2007.

6. Bondar O. G., Brezhnev E. O. *Sposob izmereniya kontsentratsii gaza kataliticheskim datchikom* [Method of measuring gas concentration by catalytic sensor]. Patent RF, no. 2698936, 2019.

7. Bondar O. G., Brezhneva E. O., Polyakova A.V. *Primenenie mikrokontrollera dlya temperaturnoi stabilizatsii poluprovodnikovyykh gazochuvstvitel'nykh datchikov* [Application of microcontroller for temperature stabilization of semiconductor gas-sensitive sensors]. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*, 2014, no. 2, pp. 41-46 (In Russ.).

8. Karpov E. E., Karpov E. F., Suchkov A., Mironov S., Baranov A., Sleptsov V., Calliari L. Energy efficient planar catalytic sensor for methane measurement. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, vol. 194, pp. 176–180.

9. Karpova E., Mironov S., Suchkov A., Karelin A., Karpov E. E., Karpov E. F. Increase of catalytic sensors stability. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 5 July 2014, vol. 197, pp. 358-363.

10. Somov A., Baranov A., Suchkov A., Karelin A., Mironov S., Karpova E. Improving interoperability of catalytic sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 31 December 2015, vol. 221, , pp. 1156-1161, ISSN 0925-4005.

11. Spirjakin D., Baranov A., Karelin A., Somov A. Wireless multi-sensor gas platform for environmental monitoring. Environmental, Energy and Structural Monitoring Systems (EESMS), 2015 IEEE Workshop on, 10 July 2015, pp. 232-237.

12. Karpov E. F., Karpov E.E., Suchkov A., Mironov S., Baranov A., Sleptsov V., Calliari L. Energy efficient planar catalytic sensor for methane measurement. *Sensors and Actuators A: Physical*, May 2013, vol. 194, pp. 176-180.

13. Abdurakhmanov E. A., Ruziev E. A. Selektivnye termokataliticheskie sensory v ekologicheskom monitoringe gazoobraznykh vybrosov [Selective thermocatalytic sensors in environmental monitoring of gaseous emissions]. *Khimicheskaya promyshlennost' = Chemical industry*, 2003, vol. 80, no. 9, pp. 444-449 (In Russ.).

14. Mao S., Lu G., Chen J. Nanocarbon-based gas sensors: progress and challenges. *J. Mater. Chem. A*, 2014, vol. 2, pp. 5573-5579.

15. Karpova E. E., Mironov S. M., Suchkov A. A., Karpov E. E., Karpov E. F. *Sposob izmereniya dovozryvnykh kontsentratsii goryuchikh gazov v vozdukh* [Method for measuring pre-explosive concentrations of combustible gases in air]. Patent RF, no. 2544358, 2015.

16. Karpova E. E., Mironov S. M., Suchkov A. A., Karpov E. E., Karpov E. F. *Sposob izmereniya kontsentratsii goryuchikh gazov i parov v vozdukh termokataliticheskim sensorom diffuzionnogo tipa* [Method for measuring the concentration of combustible gases and vapors in the air with a diffusion-type thermocatalytic sensor]. Patent RF, no. 2623828, 2015.

17. Kolmakov A., Sysoev V. V. Analyte multi-sensor for the detection and identification of analyte and a method of using the same / -us Patent US8443647. Publ. 21.05.2013.
 18. Hubert T., Boon-Brett L., Black G., Banacha U. Hydrogen sensors – A review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, pp. 329-352.
 19. Karelin A., Karpov E.E., Karpov E.F., Mironov S., Baranov A., Sleptsov V., Napolsky K. Applying Catalytic Sensor in Non-volatile Wireless Sensor Networks. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 120, pp. 1019-1023.
 20. Macias M. M. Gas sensor measurements during the initial action period of duty cycling for power saving. *Sensors and Actuators B*, 2017, vol. 239, pp. 1003-1009.
-

Информация об авторах / Information about the Authors

Бондарь Олег Григорьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры космического приборостроения и систем связи ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: b.og@mail.ru

Oleg G. Bondar, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: b.og@mail.ru

Брежнева Екатерина Олеговна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры космического приборостроения и систем связи ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: bregnevaeo@mail.ru

Ekaterina O. Brezhneva, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: bregnevaeo@mail.ru