

УДК 62-783.2

© И. И. Иванов, А. М. Баранов, В. А. Талипов, С. М. Миронов,
И. В. Иванушкин, Е. А. Бутенков, А. Б. Шумаков, 2021

БЕСПРОВОДНОЙ СИГНАЛИЗАТОР МЕТАНА С МОДУЛИРОВАННЫМ ПО ТЕМПЕРАТУРЕ ПРОФИЛЕМ НАГРЕВА

Представлены результаты разработки автономного бытового сигнализатора метана, работающего в динамическом режиме измерений. В качестве термокаталитических сенсоров были использованы промышленные сенсоры. Для предотвращения перегорания микронагревателя термокаталитического сенсора, которое часто имеет место при импульсном нагреве, разработана специальная форма нагревающего импульса. Предложенный динамический режим нагрева сенсора позволяет проводить измерения с малым энергопотреблением и требуемым уровнем безопасности в диапазоне измерения дозврывных концентраций от 0.1 до 2 об.%. На основе анализа полученных результатов измерений дана оценка времени автономной работы сигнализатора.

Кл. сл.: сигнализатор метана, термокаталитический сенсор, надежность микронагревателя, динамический режим проведения измерений, время автономной работы

ВВЕДЕНИЕ

Возможность проведения мониторинга концентрации горючих и взрывоопасных газов является решающей в предотвращении чрезвычайных ситуаций, связанных с их утечкой. Данная задача решается с помощью датчиков газов, среди которых одними из самых распространенных для мониторинга горючих газов являются термокаталитические сенсоры. Более того, в связи с развитием беспроводных технологий чрезвычайно актуальной становится задача разработки беспроводных автономных систем мониторинга газового состава окружающей среды [1].

Для измерения концентрации горючих веществ наиболее широко применяется термокаталитический принцип газового анализа [2]. При этом для проведения измерений с помощью термокаталитических сенсоров используют статические и динамические режимы их работы. Статический режим работы характеризуется тем, что сенсор или пара сенсоров (рабочий – сравнительный) нагреваются до рабочей температуры, которая длительно поддерживается для мониторинга концентрации горючих газов [3]. Динамический режим работы характеризуется тем, что температура сенсора изменяется по определенному закону при проведении измерений, в частности сенсор может нагреваться до 2–4 разных рабочих температур [4] или может выполняться режим температурного сканирование в заданном интервале температур

[5]. Важно отметить, что измерения выходного сигнала при работе в динамическом режиме производят циклически (периодически). После каждого цикла измерений следует пауза, длительность которой определяется нормативными документами, требующими иметь отклик через определенное время после появления горючих газов в воздухе. Появление в воздушной среде горючих газов приводит к изменению выходного сигнала как при статическом, так и при динамическом режимах измерений, который регистрируется измерительной схемой.

В последнее время термокаталитические сенсоры все чаще используются именно в режиме динамических измерений [4, 6]. Это позволяет экономить потребляемую энергию [7], что важно для переносных и автономных датчиков, а с другой стороны, это позволяет расширить измерительные возможности термокаталитического метода, т.к. проведение измерений при разных температурах позволяет иметь больше данных для последующей обработки и, в частности, повысить точность, селективность и чувствительность измерений [8].

В данной статье представлены результаты разработки автономного бытового сигнализатора метана, работающего в динамическом режиме измерений. При этом для предотвращения перегорания микронагревателя сенсора, которое часто имеет место при импульсном нагреве, разработана специальная форма нагревающего импульса. Для управления внешними устройствами сигнализатор

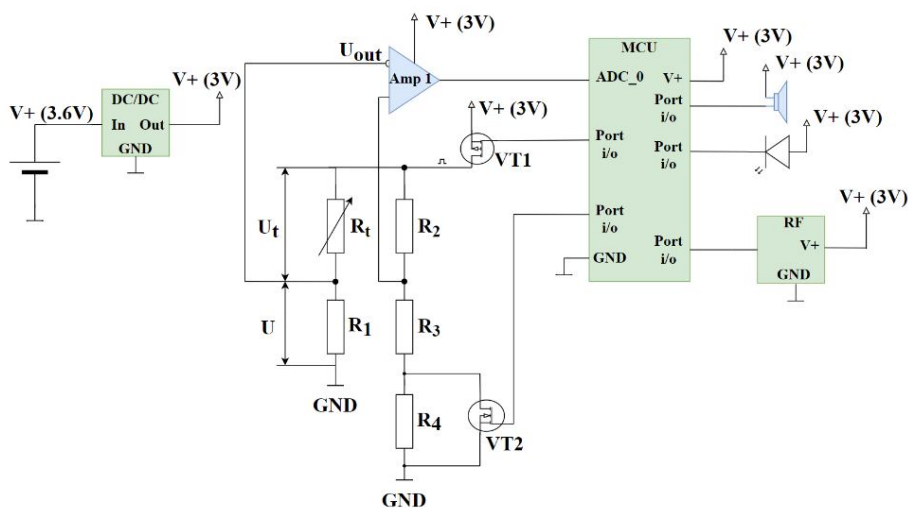
имеет радиомодуль, который обеспечивает передачу команд исполнительным устройствам, в частности запорным клапанам [9].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Блок-схема сигнализатора метана представлена на рис. 1. Основными элементами схемы являются: микроконтроллер MCU — STM8L051F3; стабилизатор напряжения DC/DC — LD2980-30DBVR; усилитель (Amp1) — LMV612MA; радиомодуль (RF) — YF-TX01 и измерительная схема, включающая термокаталитический сенсор R_t , резисторы R_{1-4} и MOSFET-транзисторы VT1 — IRL9321 SO-8, VT2 — IRLML6244.

В качестве термокаталитических сенсоров были взяты промышленные сенсоры, которые серийно выпускаются фирмой ООО "НТЦ ИГД" [10]. Данные сенсоры имеют энергопотребление 140 мВт в статическом режиме измерений при работе в составе мостовой измерительной схемы. Величина рабочего напряжения составляет 2.8 В. Рабочий ток лежит в диапазоне 50–52 мА. Указанное энергопотребление на сегодняшний день является минимально возможным из всех имеющихся на рынке объемных каталитических сенсоров, что позволяет использовать их в автономных устройствах и обеспечивает продленный срок службы батарей.

Управление сигнализатором осуществляется 8-битным 16 МГц микроконтроллером со сверхнизким энергопотреблением. MCU включает в себя: 12-битный АЦП, часы реального времени, два 16-битных таймера, один 8-битный таймер, а также стандартные интерфейсы связи, такие как SPI, интерфейс I2C и один USART. MCU, согласно алгоритму записанного в него программного обеспечения, задает режим питания сигнализатора, обрабатывает информацию, получаемую с выхода измерительной схемы, и интерпретирует полученную информацию. Кроме того, в случае превышения установленного порогового значения концентрации, MCU выдает сигнал на радиомодуль о закрытии запорного клапана и включает прерывистые световую и звуковую индикации, оповещающие об утечке газа. Передача управляющих сигналов осуществляется посредством неповторяющихся кодированных радиосигналов на частоте 433 МГц с дальностью передачи, достигающей 100 м. Для обеспечения широтно-импульсной модуляции (ШИМ) в качестве коммутационного элемента используется MOSFET-транзистор VT1, работающий в режиме ключа. Сигнализатор снабжен автономным Li/SOCl₂ источником тока типоразмера D с энергоемкостью 19 000 мА·ч и номинальным напряжением 3.6 В, которое преобразовывается стабилизатором в выходное напряжения 3 В.



а



б

Рис. 1. Функциональная схема беспроводного сенсорного узла (а) и изготовленный опытный образец сигнализатора (б)

Принцип проведения измерений основан на подключении сенсора в схему с резистивным делителем напряжения, на который подается нагревающее напряжение. Выходной сигнал с делителя U_{out} усиливается операционным усилителем и поступает на порт ADC_0 микроконтроллера.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Традиционным подходом для проведения измерений является использование мостовой измерительной схемы [11]. Мостовая измерительная схема позволяет уменьшить влияние неконтролируемых внешних факторов (температуры, влажности и давления) на результат измерений. Но т.к. в этом случае приходится нагревать рабочий и сравнительный сенсоры, то для автономных датчиков такая измерительная схема не является энергоэффективной. В результате ее применения заметно снижается время автономной работы. Поэтому было предложено перейти от мостовой измерительной схемы к схеме с резистивным делителем. А в качестве нагревающего напряжения использовать двухступенчатый импульс нагрева прямоугольной формы, параметры которого выбирались следующим образом.

Выбор амплитуды нагревающих импульсов был сделан на основе формы отклика термокаталитического сенсора. На рис. 2 представлена S-образная зависимость чувствительности термока-

талолического сенсора от подаваемого напряжения питания в установившейся атмосфере, содержащей метан. Из рис. 2 видно, что до напряжения 0.6 В (или до температуры 200 °С) отклик сенсора отсутствует, что означает, что реакция окисления метана не протекает. При этом молекулы воды, сорбированные носителем катализатора из окружающей атмосферы, испаряются. Поэтому в качестве нагревающего импульса напряжения мы выбрали значение 0.6 В и длительность 2 с. При этом надо помнить, что часть приложенного напряжения падает на резисторе R_1 (рис. 3). Таким образом, первая ступень не зависит от концентрации детектируемого горючего газа и снижает зависимость измерений от влажности окружающей среды.

Вторая ступень имеет амплитуду напряжения 1.7 В и длительность 1 с (рис. 3). При этом на сам сенсор подается напряжение 1.5 В, что вызывает его нагрев до температуры 450–490 °С (рис. 2). При данной температуре происходит полное каталитическое окисление метана, которое сопровождается выделением тепла. Это приводит к дополнительному увеличению температуры сенсора, а следовательно, увеличивает его сопротивление.

Длительность первой и второй ступени определяется временем выхода сенсора на стабильный отклик. На третьем этапе следует пауза в течении 27 с, после чего подача импульсов нагрева начинается заново.

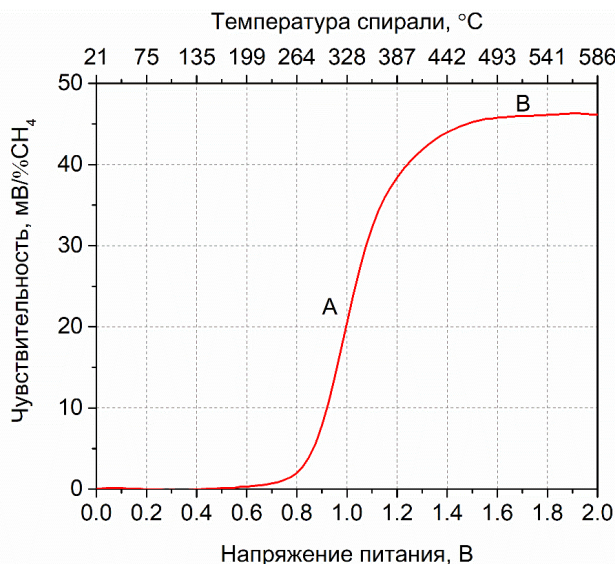


Рис. 2. Экспериментальная зависимость чувствительности термокаталитического сенсора от приложенного нагревающего напряжения

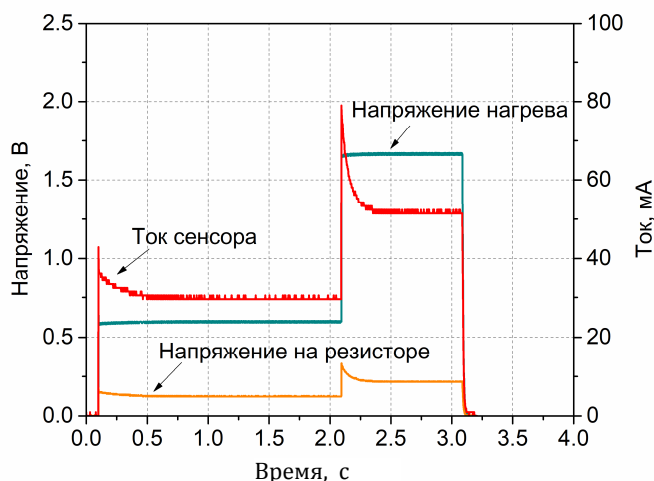


Рис. 3. Двухступенчатый профиль нагрева

Периодичность подачи нагревающих импульсов задается нормативными документами на сигнализаторы горючих газов, в соответствии с которыми измерения должны проходить не реже, чем раз в 30 с [12].

Таким образом, предложенный профиль нагрева термокаталитического сенсора, необходимый для проведения измерений, состоит из трех частей с амплитудой 0.6, 1.7, 0 В.

При разработке двухстадийного нагревающего импульса и проведении динамических измерений была выявлена проблема выхода из строя термокаталитических сенсоров. В используемой методологии проведения измерений на сенсор подается сразу номинальное значение напряжения, которое вызывает его сверхбыстрый разогрев до требуемой температуры. При этом в первоначальный момент времени ток, протекающий через сенсор, значительно превышает номинальное значение в 52 мА (рис. 3). Такой сверхбыстрый нагрев сенсора вызывает резкий рост механических напряжений из-за разного температурного коэффициента расширения (ТКР) материалов сенсора и может вызвать обрыв микронагревателя сенсора. Важно также учесть, что сигнализатор метана должен работать постоянно в периодическом режиме проведения измерений. Проведение измерений с периодичностью 1 раз в 30 с дает 2880 измерений в сутки, что может вызывать преждевременное перегорание микронагревателя или обрыв контактов.

Для устранения выявленной проблемы и повышения надежности работы сигнализатора было предложено изменить форму двухстадийного нагревающего импульса напряжения и плавно увели-

чивать напряжение от 0 до 0.6 В и от 0.6 до 1.7 В для первой и второй стадии нагрева соответственно. Для этого была использована широтно-импульсная модуляция (ШИМ) с переменной скважностью. Для обеспечения ШИМ в качестве коммутационного элемента используется MOSFET-транзистор VT1, работающий в режиме ключа (рис. 1).

Поставленная задача сводится к тому, чтобы при подаче нагревающего напряжения протекающий через сенсор ток не превышал номинальное значение 52 мА. Постепенное увеличение напряжения, изображенное на рис. 4, выполняется в течение 0.4 секунд для каждой из двух ступеней, т.е. времени, которое приблизительно соответствует времени разогрева сенсора при приложении к нему импульсов напряжения 0.6 и 1.7 В. Длительность основных ступеней нагрева не изменилась и, как и ранее, составляла 2 с и 1 с соответственно (рис. 4).

Критерий непревышения номинального тока определяется законом Ома. Если номинальное значение тока 52 мА, а сопротивление сенсора при комнатной температуре 12 Ом, то начальное значение напряжения не может превышать 0.62 В. Поэтому, если брать меньшую амплитуду напряжения, то ток не будет превышать номинального значения. Но даже такая величина приложенного напряжения может вызвать быстрый разогрев материала. Поэтому в нашем случае мы разбили нагрев на 11 ступеней для напряжения от 0 до 0.6 В и на 8 ступеней при увеличении напряжения от 0.6 до 1.7 В.

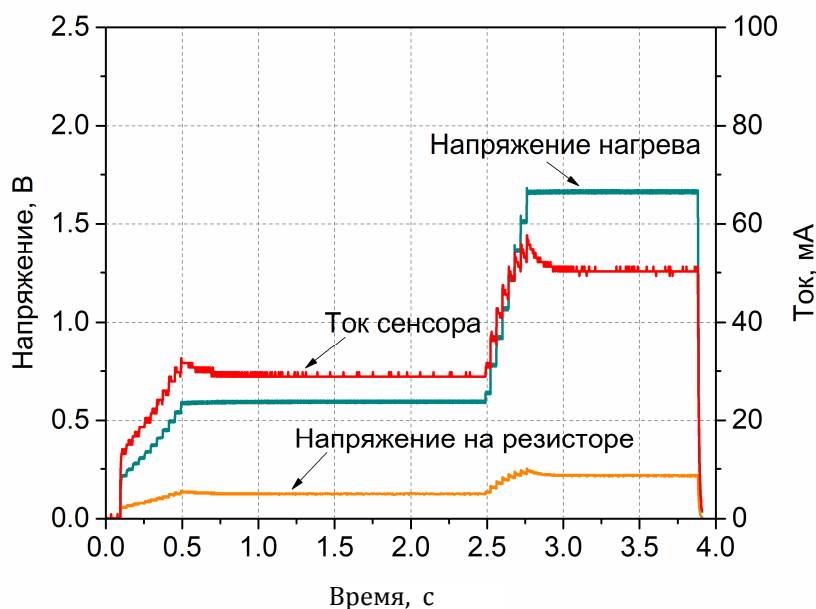


Рис. 4. Двухступенчатый профиль нагрева с постепенным увеличением напряжения нагрева

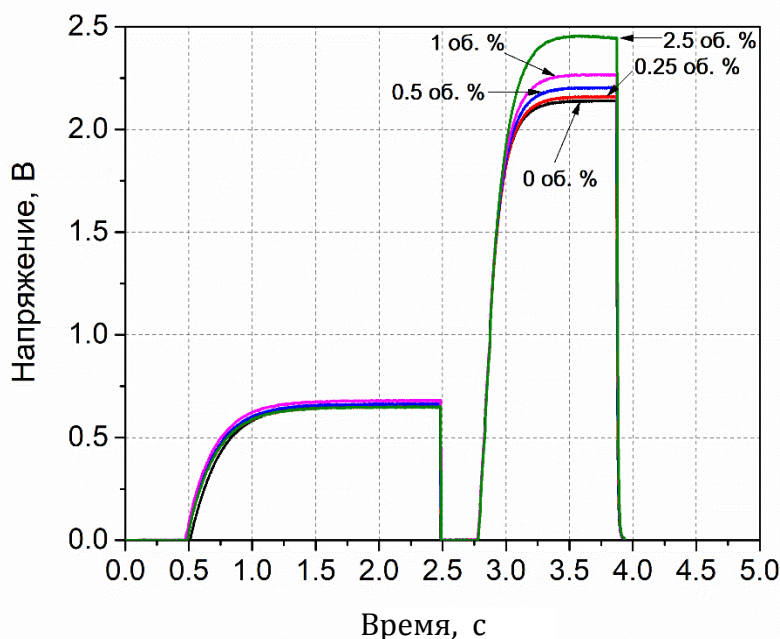


Рис. 5. Динамические зависимости выходного напряжения с резистивного делителя для различных концентраций CH_4

На рис. 5 представлены динамические зависимости напряжения, снимаемого с резистивного делителя, при различных концентрациях метана: 0, 0.25, 0.5, 1 и 2.5 об.%. Как было указано выше, температура на первой ступени двухстадийного нагревающего импульса не является достаточной для начала процесса окисления метана. Поэтому напряжение на выходе делителя не будет зависеть от концентрации метана (рис. 5).

В то же время на второй ступени двухстадийного нагревающего импульса напряжение на выходе делителя будет зависеть от концентрации метана в воздухе (рис. 5). Здесь явно выражено различие сигнала между первой и второй ступенями на выходе измерительной схемы для различных концентраций метана.

Так как в области дозрывоопасных концентраций горючих газов отклик термокаталитических сенсоров линейный, то за полезный сигнал можно взять величину

$$\Delta U = U_2 - U_1, \quad (1)$$

где U_2 и U_1 — напряжения на выходе делителя в конце второй и первой ступеней нагревающего импульса.

До начала работы сигнализатора необходимо провести калибровку сенсора. Это традиционная операция, и обычно выполняется при нулевой и при одной известной концентрации метана в воздухе. Для проведения калибровки используются поверочные газовые смеси (ПГС); ПГС в нашем случае имела 1 об.% CH_4 . Разница двух величин полезного сигнала в конце второй ступни нагрева при ну-

левой концентрации и при 1 об.% CH_4 , деленная на концентрацию метана в ПГС, дает чувствительность измерительной схемы в единицах измерения мВ на процент метана. В проведенных экспериментах было получено значение 14 мВ/ об.% CH_4 . В качестве порога срабатывания сигнализатора было выбрано значение концентрации 20% НКПР (нижний концентрационный предел распространения пламени), или 0.8 об.% CH_4 . Значение чувствительности при концентрации метана 0.8 об.% ($\Delta U_{0.8}$) было занесено в память микроконтроллера. А сам микроконтроллер был запрограммирован таким образом, что если значение ΔU , полученное в цикле измерения, превышает установленное значение $\Delta U_{0.8}$, то это означает, что в данный момент концентрация метана превышает установленное пороговое значение, и автоматически будет подан звуковой и световой сигналы тревоги, а также микроконтроллер выдаст команду на радиомодуль для закрытия газового клапана.

Для автономных устройств важным параметром является время автономной работы. Время автономной работы можно оценить на основе измеренных характеристик сигнализатора. Основным потребителем энергии в сигнализаторе метана является термокаталитический сенсор. Поэтому в оценочном расчете было учтено только потребление самого сенсора без учета потребления мощности микроконтроллером, DC/DC преобразователем и другими элементами схемы. Для этого нужно рассчитать расход энергии W за один измерительный цикл, взяв интеграл

$$W = \int_0^T U(t) \cdot I(t) \cdot dt, \quad (2)$$

где T_i — время импульса, $U(t)$ — мгновенное напряжение, $I(t)$ — мгновенный ток.

Полученное значение $W \cong 145$ мДж. Емкость литиевой батареи D-типа 19000 мА·ч, среднее значение напряжения батареи под нагрузкой пусть будет 3.3 В. Таким образом, энергия, запасаемая батареей, равна 62 700 мВт·ч. В результате получаем, что сигнализатор может работать автономно приблизительно 540 дней (без учета потребления энергии электронными компонентами сигнализатора).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты разработки автономного беспроводного сигнализатора метана и оптимизации способа проведения измерений.

В качестве датчиков были использованы промышленные термокаталитические сенсоры. Для проведения измерений разработан двухстадийный нагревающий импульс. Чтобы предотвратить перегорание микронагревателя термокаталитического сенсора, разработана специальная форма нагревающего импульса, при которой на начальной стадии нагрева за счет использования ШИМ происходит плавное увеличение напряжения. Предложенная методика позволяет проводить измерения с малым энергопотреблением и требуемым уровнем безопасности в диапазоне измерения взрывных концентраций от 0.1 до 2 об.%. Время автономной работы сигнализатора составляет приблизительно 540 дней при одном измерении в 30 с. Данное время можно дополнительно увеличить за счет сокращения длительности проведения измерений или увеличения их периодичности.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке и оптимизации термокаталитических сенсоров и методик проведения измерений, что позволит расширить области их применения.

Разработанный сигнализатор метана, работающий автономно долгое время, может найти применение для экологического мониторинга в составе беспроводных сенсорных сетей [13], в технологиях Интернета вещей [14] и Умного дома [15], в частности в качестве бытового сигнализатора утечек метана в газифицированных многоквартирных и индивидуальных домах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ННФИ в рамках научного проекта № 20-57-56001

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смотаев Н.Н., Иванова А.В., Облов К.Ю., Соловьев С.А., Каменев С.А., Санков Н.С. Мультисенсорная система с беспроводным каналом связи для монито-

- ринга газового состава среды // Датчики и системы. 2015. № 1 (188). С. 38–41.
2. Карпов Е.Ф., Басовский Б.И. Контроль проветривания и дегазации в угольных шахтах: Справочное пособие. М.: Недра, 1994. 336 с.
3. Gopel W., Jones T.A., Kleitz M., Lundstrom I., Seiyama T., Hesse J., Zemel J.N. Sensors: a Comprehensive Survey Chemical and Biochemical Sensors: Vol. 2, Part I. Weinheim: Wiley-VCH, 1991. 734 p. DOI: 10.1002/9783527620135
4. Spirjakin D., Baranov A.M., Somov A., Sleptsov V. Investigation of heating profiles and optimization of power consumption of gas sensors for wireless sensor networks // Sensors and Actuators A. Physical. 2016. Vol. 247, P. 247–253. DOI: 10.1016/j.sna.2016.05.049
5. Korotcenkov G., Cho B.K. Engineering approaches for the improvement of conductometric gas sensor parameters. Part 1. Improvement of sensor sensitivity and selectivity (short survey) // Sensors and Actuators B. Chemical. 2013. Vol. 188, P. 709–728. DOI: 10.1016/j.snb.2013.07.101
6. Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., Трехлебов А.С., Поляков Н.В. Особенности работы термокаталитических сенсоров в динамическом режиме // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения. Сборник научных статей по материалам IV Всероссийской научно-практической конференции, в 2 частях. 2020. С. 162–173.
7. Baranov A., Spirjakin D., Akbari S., Somov A. Optimization of power consumption for gas sensor nodes: A survey // Sensors and Actuators A. Physical. 2015. Vol. 233, P. 279–289. DOI: 10.1016/j.sna.2015.07.016
8. Лашков А.В., Анашкин А.А., Анашкин А.А., Мусатов В.Ю., Сысоев В.В. Оценка возможности применения термокаталитических сенсоров для формирования газоаналитических мультисенсорных систем // Датчики и системы. 2013. № 5 (168). С. 38–42.
9. Мельников Ю.П., Малышев А.Ю., Тишин А.М., Конелиович Д.Б. Электромагнитный клапан и автоматизированная система на основе этого клапана. Патент ЕС № 13720, 30.06.2010.
10. ДТК 3 сенсор горючих газов. URL: <http://karpov-sensor.com/wp-content/uploads/2019/04/DTK3-RV.pdf> [Электронный ресурс] (дата обращения 10.09.2021).
11. Дивин А.Г., Пономарев С.В. Методы и средства измерений, испытаний и контроля. Часть 4. Методы и средства измерения состава и свойств веществ. Тамбов: ФГБОУ ВПО "ТГТУ", 2014. 104 с.
12. ГОСТ Р 52350.29.1-2010. Национальный стандарт РФ. Взрывоопасные среды. Часть 29-1. Газоанализаторы. Общие технические требования и методы испытаний газоанализаторов горючих газов, 01.01.2010.
13. Spirjakin D., Baranov A.M., Karelin A., Somov A. Wireless multi-sensor gas platform for environmental monitoring // 2015 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS). Proceedings. 2015. P. 232–237. DOI: 10.1109/EESMS.2015.7175883.

14. Mariselvam V., Dharshini M.S. IoT based level detection of gas for booking management using integrated sensor // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 37. P. 789–792. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.05.825
15. Dong B., Shi Q., Yang Y., Wen F., Zhang Z., Lee C. Technology evolution from self-powered sensors to AIoT enabled smart homes // *Nano Energy*. 2021. Vol. 79. Art. 105414. DOI: 10.1016/j.nanoen.2020.105414

Научно-производственное предприятие "Фирма "АЭРОТЕСТ", Томилино (Иванушкин И.В., Бутенков Е.А., Шумаков А.Б.)

Контакты: Иванов Иван Иванович,
I.Ivan1993@yandex.ru

Московский авиационный институт, Москва (Иванов И.И., Баранов А.М.)

Научно-технический центр измерительных газочувствительных датчиков им. Е.Ф. Карпова, Люберцы (Талипов В.А., Миронов С.М.)

Материал поступил в редакцию 12.09.2021

WIRELESS METHANE DETECTOR WITH TEMPERATURE MODULATED HEATING PROFILE

**I. I. Ivanov¹, A. M. Baranov¹, V. A. Talipov², S. M. Mironov²,
I. V. Ivanushkin³, E. A. Butenkov³, A. B. Shumakov³**

¹*Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia*

²*Scientific and Technical Center of Measuring Gas Sensing Sensors named after E.F. Karpova, Lyubertsy, Russia*

³*Research and Production Enterprise "Company" AEROTEST", Tomilino, Russia*

The results of development of an autonomous methane detector in a dynamic measurement mode are presented. Industrial catalytic sensor was used as a sensitive element. To prevent burnout of the catalytic sensor microheater which often occurs during pulsed heating, the special form of heating pulse has been developed. The proposed dynamic mode of the sensor heating provides the measurements with low power consumption and the required level of safety in the measurement range of pre-explosive methane concentrations from 0.1 to 2 vol.%. Based on the analysis of the obtained results, the estimation of autonomous operating time of the detector is given.

Keywords: methane detector, catalytic sensor, microheater reliability, dynamic measurement mode, battery life

INTRODUCTION

The ability to monitor the concentration of flammable and explosive gases is critical in preventing leakage emergencies. This problem is solved using gas sensors, among which thermocatalytic sensors are one of the most common for monitoring combustible gases. Moreover, in connection with the development of wireless technologies, the task of developing wireless autonomous systems for monitoring gas composition of the environment becomes extremely urgent [1].

The thermocatalytic principle of gas analysis is most widely used to measure the concentration of

combustible substances [2]. Static and dynamic modes of their operation are used to carry out measurements using thermocatalytic sensors. The static mode of operation is characterized by the fact that the sensor or a pair of sensors (working — comparative) are heated up to the operating temperature, which is maintained for a long time to monitor the concentration of combustible gases [3]. The dynamic mode of operation is characterized by the fact that the temperature of the sensor changes according to a certain pattern during measurements, in particular, the sensor can heat up to 2–4 various operating temperatures [4], or the temperature scanning mode can be performed in a given

temperature range [5]. It is important to note that the measurements of the output signal are performed cyclically (periodically) when operating in a dynamic mode. After each measurement cycle, a pause follows, the duration of which is determined by regulatory documents that require a response within a certain time after the appearance of combustible gases in the air. The appearance of combustible gases in the air leads to a change in the output signal in both static and dynamic measurement modes, and is recorded by the measuring circuit.

Recently, thermocatalytic sensors are increasingly used in the dynamic measurement mode [4, 6]. This lets to reduce energy consumption [7], which is important for portable and autonomous sensors, and on the other hand, it lets to expand the measuring capabilities of the thermocatalytic method, because carrying out measurements at different temperatures provides more data for subsequent processing and, in particular, to increase the accuracy, selectivity and sensitivity of measurements [8].

This article presents the results of the development of an autonomous home methane alarm operating in a dynamic measurement mode. To prevent a burnout of the sensor microheater, which often occurs during pulse heating, a special form of heating pulse has been developed. To control external devices, the methane detector has a radio module, which provides the transmission of commands to executive devices, in particular, shut-off valves [9].

EXPERIMENTAL PROCEDURE

The block diagram of the methane detector is shown in Fig. 1. The main elements of the circuit are: MCU STM8L051F3; DC / DC voltage stabilizer LD2980-30DBVR; amplifier (Amp1) LMV612MA; radio module (RF) YF-TX01 and measuring circuit, including thermocatalytic sensor R_t , resistors R_{1-4} and MOSFET transistors VT1 IRF9321 SO-8, VT2 IRLML6244.

Fig. 1. Functional diagram of the wireless sensor node (a) and the manufactured prototype of the signaling device (б)

As thermocatalytic, industrial sensors were used, commercially produced by ООО "НТЦ ИГД" [NTC IGD Ltd] [10]. These sensors have a power consumption of 140 mW in static measurement mode when operating as part of a bridge measuring circuit. The operating voltage is 2.8 V. The operating current is in the range of 50–52 mA. This energy consumption is currently the lowest possible of all volumetric catalytic sensors on the market, which makes them usable in stand-alone devices and provides extended battery life.

The methane detector is controlled by an ultra-low power 8-bit 16 MHz microcontroller. The MCU includes: 12-bit ADC, real-time clock, two 16-bit timers, one 8-bit timer, and standard communication interfaces such as SPIs, I2C interface, and one USART. The MCU, according to the software algorithm, sets the methane detector power mode, processes the information received from the output of the measuring circuit, and interprets data. In addition, if the preset concentration threshold is exceeded, the MCU sends a signal to the radio module to close the shut-off valve and turns on intermittent light and sound indications, notifying of a gas leak. The transmission of control signals is carried out by means of non-repetitive encoded radio signals at a frequency of 433 MHz with a transmission range of up to 100 m. To ensure pulse width modulation (PWM), a MOSFET transistor VT1 operating in the key mode is used as a switching element. The indicator is equipped with an autonomous Li / SOCl₂ current source of standard size D with an energy capacity of 19 000 mA·h and a rated voltage of 3.6 V, which is converted to an output voltage of 3 V by a stabilizer.

The measurement principle is based on connecting the sensor to a circuit with a resistive voltage divider, to which a heating voltage is supplied. The output signal from the U_{out} divider is increased by an operational amplifier and goes to the microcontroller ADC_0 port.

RESULTS AND DISCUSSION

The traditional approach for carrying out measurements is the use of a bridge measuring circuit [11]. The bridge measuring circuit lets to reduce the influence of uncontrolled external factors (temperature, humidity and pressure) on the measurement result. But since it is necessary to heat the working and comparative sensors in this case, such a measuring circuit is not energy efficient for stand-alone sensors. As a result of its use, the battery life gets noticeably reduced. Therefore, it was proposed to switch from a bridge measuring circuit to a circuit with a resistive divider. And as the heating voltage, use a two-stage rectangular heating pulse, the parameters of which were chosen as follows.

The choice of the heating pulse amplitude was made on the basis of the response shape of the thermocatalytic sensor. Fig. 2 shows the S-shaped dependence of the sensitivity of the thermocatalytic sensor on the supplied voltage in a steady atmosphere containing methane. Fig. 2 shows that up to a voltage of 0.6 V (or up to a temperature of 200 °C) there is no sensor response, that means that the methane oxidation reaction does not proceed. In this case, water molecules sorbed by the catalyst carrier from the surrounding atmosphere evaporate.

Fig. 2. Experimental dependence of the sensitivity of the thermocatalytic sensor on the applied heating voltage

Fig. 3. Two-stage heating profile

Therefore, for the heating pulse of voltage, we chose a value of 0.6 V and a duration of 2 s. It should be remembered that part of the applied voltage drops across the resistor R_1 (Fig. 3). Thus, the first stage does not depend on the concentration of the detected combustible gas and reduces the dependence of the measurements on the ambient humidity.

The second stage has a voltage amplitude of 1.7 V and a duration of 1 s (Fig. 3). In this case, a voltage of 1.5 V is applied to the sensor, causing it to heat up to a temperature of 450–490 °C (Fig. 2). At this temperature, complete catalytic oxidation of methane occurs, accompanied by the release of heat. This leads to an additional increase in the temperature of the sensor, and therefore increases its resistance.

The duration of the first and second stages is determined by the time the sensor reaches a stable response. At the third stage, there is a pause for 27 s, after which the supply of heating pulses starts again.

The frequency of supply is set by the regulatory documents for flammable gas alarms, according to which measurements should be carried out at least once every 30 s [12].

Thus, the proposed heating profile of the thermocatalytic sensor required for measurements consists of three parts with an amplitude of 0.6, 1.7, 0 V.

While developing a two-stage heating pulse and performing dynamic measurements, the problem of failure of thermocatalytic sensors was identified. In the used measurement methodology, the sensor is immediately supplied with a nominal voltage value, which causes its ultra-fast warming up to the required temperature. In this case, at the initial moment of time, the current flowing through the sensor significantly exceeds the nominal value 52 mA (Fig. 3). Such ultra-fast heating of the sensor causes a sharp increase in mechanical stresses due to the different thermal expansion coefficient (TEC) of the sensor materials and can cause a breakage of the microheater of the sensor. It is also important to take into account that the methane detector must operate continuously in a periodic measurement mode. Carrying out measurements with a frequency of 1 time per 30 s makes up 2880 measurements per day, which can cause premature burnout of the microheater or breakage of contacts.

To eliminate the identified problem and improve the reliability of the detector, it was proposed to change the shape of the two-stage heating voltage pulse and smoothly increase the voltage from 0 to 0.6 V and from 0.6 to 1.7 V for the first and second heating stages, respectively. For this, pulse width modulation (PWM) with variable duty cycle was used. To provide PWM, a MOSFET transistor VT1 is used as a switching element, operating in the key mode (Fig. 1).

The task is to ensure that when the heating voltage is applied, the current flowing through the sensor does not exceed the nominal value of 52 mA. The gradual increase in voltage shown in Fig. 4 is executed for 0.4 s for each of the two stages, i.e. time, which approximately corresponds to the heating time of the sensor when voltage pulses of 0.6 and 1.7 V are applied to it. The duration of the main heating stages did not change and, as before, was 2 s and 1 s, respectively (Fig. 4).

Fig. 4. Two-stage profile for heating with gradual increase in heating

The criterion for not exceeding the rated current is determined by Ohm's law. If the nominal current is 52 mA and the sensor resistance at room temperature is 12 Ω , then the initial voltage value cannot exceed 0.62 V. Therefore, if we take a smaller voltage amplitude, then the current will not exceed the nominal value. But even this magnitude of the applied voltage can cause rapid heating of the material. Therefore we divided the heating into 11 steps, for a voltage from 0 to 0.6 V and into 8 steps with an increase in voltage from 0.6 to 1.7 V. Fig. 5 shows the dynamic dependences of the voltage taken from the resistive divider at various methane concentrations: 0, 0.25, 0.5, 1, and 2.5 vol.%. As mentioned above, the temperature in the first stage of the two-stage heating pulse is not sufficient to initiate the methane oxidation process. Therefore, the voltage at the output of the divider will not depend on the methane concentration (Fig. 5).

Fig. 5. Dynamic dependence of output voltage from resistive divider for various concentrations of CH_4

At the same time, at the second stage of the two-stage heating pulse, the voltage at the output of the divider will depend on the concentration of methane in the air (Fig. 5). Here, the difference in the signal between the first and second stages at the output of the measuring circuit for different methane concentrations is clearly expressed.

Since in the range of pre-explosive concentrations of combustible gases the response of thermocatalytic sensors is linear, then the following value can be taken as the useful signal

$$\Delta U = U_2 - U_1, \quad (1)$$

where U_2 and U_1 are the voltage at the output of the divider at the end of the second and first stages of the heating pulse.

The sensor must be calibrated prior to starting the detector. This is a traditional operation and is usually performed at zero and one known concentration of methane in the air. Calibration gas mixture (CGM), used in our case, had 1 vol.% CH_4 . The difference between the two values of the useful signal at the end of the second heating stage at zero concentration and at 1 vol.% CH_4 , divided by the concentration of methane in the CGM, gives the value of sensitivity of the measuring circuit in mV per percentage of methane. In the experiments performed, a value of 14 mV / vol.% CH_4 was obtained. The concentration value of 20% LEL (lower concentration limit of flame propagation), or 0.8 vol.% CH_4 , was chosen as the alarm threshold. The sensitivity value at a methane concentration of 0.8 vol.% ($\Delta U_{0.8}$) was entered into the microcontroller's memory. And the microcontroller itself was programmed in such a way that if the value of ΔU obtained in the measurement cycle exceeds the set value of $\Delta U_{0.8}$, then this means that at the moment the concentration of methane exceeds the set threshold value and an audible and visual alarm would be automatically triggered and the microcontroller would issue a command to the radio module to close the gas valve.

For stand-alone devices, an important parameter is the battery life. The battery life can be estimated on the basis of the measured characteristics of the detector. The main consumer of energy in a methane detector is a thermocatalytic sensor. Therefore, in the estimation calculation, only the consumption of the sensor itself was taken into account, without taking into account the power consumption of the microcontroller, DC / DC converter and other circuit elements. To do this, one need to calculate the energy consumption W in one measuring cycle, calculating the integral

$$W = \int_0^{T_i} U(t) \cdot I(t) \cdot dt, \quad (2)$$

where T_i is the pulse time, $U(t)$ is the instantaneous voltage, $I(t)$ is the instantaneous current.

The resulting value is $W \cong 145$ mJ. The capacity of the D-type lithium battery is 19 000 mA·h, the average voltage of the battery under load is 3.3 V. Thus, the energy stored by the battery is 62 700 mW·h. As a result, we achieved that the signaling device can work autonomously for about 540 days (excluding the energy consumption of the electronic components of the signaling device).

CONCLUSION

The paper presents the results of the development of an autonomous wireless methane detector and optimization of the measurement method. Industrial thermocatalytic sensors were used as the sensitive elements. For measurements, a two-stage heating pulse has been developed. To prevent burnout of the microheater of the thermocatalytic sensor, a special form of heating pulse has been developed, in which at the initial stage of heating due to the use of PWM, a smooth increase in voltage occurs. The proposed technique makes it possible to carry out measurements with low power consumption and the required level of safety in the measurement range of pre-explosive concentrations from 0.1 to 2 vol.%. The battery life of the detector is approximately 540 days with one measurement per 30 s. This time can be further increased by reducing the duration of measurements or decreasing their frequency.

The obtained results can be used in the development and optimization of thermocatalytic sensors and measurement techniques, which will expand the scope of their application.

The developed methane detector, which operates autonomously for a long time, can be used for environmental monitoring as part of wireless sensor networks [13], in the technologies of the Internet of Things [14] and Smart home [15], in particular, as a household methane leak detector in gasified apartment and individual houses.

REFERENCES

1. Samotaev N.N., Ivanova A.V., Oblov K.Yu., Solov'ev S.A., Kamenev S.A., Sankov N.S. [Multi-touch system with wireless communication channel for monitoring the gas composition of the medium]. *Datchiki & Sistemi* [Sensors & Systems], 2015, no. 1 (188), pp. 38–41. (In Russ.).
2. Karpov E.F., Basovskii B.I. *Kontrol' provetrivaniya i degazatsii v ugol'nykh shakhtakh: Spravochnoe posobie* [Reference book of the Control of Ventilation and Degassing in Coal Mines]. Moscow, Nedra Publ., 1994. 336 p. (In Russ.).
3. Gopel W., Jones T.A., Kleitz M., Lundstrom I., Seiyama T., Hesse J., Zemel J.N. *Sensors: a Comprehensive Survey Chemical and Biochemical Sensors: vol. 2, part I*. Weinheim: Wiley-VCH, 1991. 734 p. DOI: 10.1002/9783527620135
4. Spirjakin D., Baranov A.M., Somov A., Sleptsov V. Investigation of heating profiles and optimization of power consumption of gas sensors for wireless sensor networks. *Sensors and Actuators A. Physical*, 2016, vol. 247, pp. 247–253. DOI: 10.1016/j.sna.2016.05.049
5. Korotcenkov G., Cho B.K. Engineering approaches for the improvement of conductometric gas sensor parameters. Part 1. Improvement of sensor sensitivity and

- selectivity (short survey). *Sensors and Actuators B. Chemical*, 2013, vol. 188, pp. 709–728. DOI: 10.1016/j.snb.2013.07.101
6. Bondar O.G., Brezhneva E.O., Trekhlebov A.S., Polyakov N.V. [Features of dynamic operation of thermocatalytic sensors]. *Infokommunikatsii i kosmicheskie tekhnologii: sostoyanie, problemy i puti resheniya. Cbornik nauchnykh statei po materialam IV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, v 2 chastyakh* [Information communications and space technologies: status, problems and solutions. Collection of scientific articles on the materials of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference, in 2 parts], 2020, pp. 162–173. (In Russ.).
 7. Baranov A., Spirjakin D., Akbari S., Somov A. Optimization of power consumption for gas sensor nodes: A survey. *Sensors and Actuators A. Physical*, 2015, vol. 233, pp. 279–289. DOI: 10.1016/j.sna.2015.07.016
 8. Lashkov A.V., Anashkin An. Al., Anashkin Al. An. [On possibility to employ catalytic combustion-type sensors to design gas-analytical multisensor arrays]. *Datchiki & Systemy* [Sensors & Systems], 2013, no. 5 (168), pp. 38–42. (In Russ.).
 9. Melnikov Yu.P., Malyshev A.Yu., Tishin A.M., Kopeliovich D.B. Ehlektromagnitnyi klapán i avtomatizirovannaya sistema na osnove ehlogo klapaná. Patent ES no. 13720. [Patent for the device solenoid valve and automated system based on this valve]. Prioritet 30.06.2010. (In Russ.).
 10. Karpov. Science and Technology Company. *DTK 3 sensor goryuchikh gazov* [DTK 3 flammable gas sensor]. URL: <http://karpov-sensor.com/wp-content/uploads/2019/04/DTK3-RV.pdf> (accessed 10.09.2021). (In Russ.).
 11. Divin A.G., Ponomarev S.V. *Metody i sredstva izmerenii, ispytaniy i kontrolya. Chast' 4. Metody i sredstva izmereniya sostava i svoystv veshchestv* [Methods and means of measurement, testing and control. Part 4. Methods and means of measuring the composition and properties of substances]. Tambov, FGBOU VPO "TG TU", 2014. 104 p. (In Russ.).
 12. *GOST R 52350.29.1-2010. Nazional'nyy standart RF. Vzryvoopasnye sredy. Chast' 29-1. Gazoanalizatory. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy gazoanalizatorov goryuchikh gazov* [GOST R 52350.29.1-2010. National standard of the Russian Federation. Explosive environments. Part 29-1. Gas analyzers. General specifications and test methods for combustible gas analyzers], 01.01.2010. . (In Russ.).
 13. Spirjakin D., Baranov A.M., Karelin A., Somov A. Wireless multi-sensor gas platform for environmental monitoring. *2015 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS). Proceedings*, 2015, pp. 232–237. DOI: 10.1109/EESMS.2015.7175883.
 14. Mariselvam V., Dharshini M.S. IoT based level detection of gas for booking management using integrated sensor. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 37, pp. 789–792. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.05.825
 15. Dong B., Shi Q., Yang Y., Wen F., Zhang Z., Lee C. Technology evolution from self-powered sensors to AIoT enabled smart homes. *Nano Energy*, 2021, vol. 79, art. 105414. DOI: 10.1016/j.nanoen.2020.105414

Contacts: *Ivanov Ivan Ivanovich*,
I.Ivan1993@yandex.ru

Article received by the editorial office on 12.09.2021