

## Цифровой газовый датчик для портативных и беспроводных газоанализаторов

*А.И. Артемова, И.В. Прокофьев, А.В. Суханов*

*НПК «Технологический центр», Зеленоград*

**Аннотация:** В статье описана концепция цифровых газовых датчиков токсичных и горючих газов для применения в портативных газоанализаторах и стационарных системах мониторинга опасных объектов. Описаны результаты разработки малопотребляющего цифрового газового датчика для определения концентрации монооксида углерода. Рассматривается структура аналогового чувствительного элемента, а также его чувствительность к различным газам и температуре окружающей среды. Представлено конструктивно-схемотехническое решение цифрового газового датчика с использованием операционных усилителей и миниатюрного микроконтроллера. Рассматривается алгоритм встроенного программного обеспечения микроконтроллера, а также процесс калибровки.

**Ключевые слова:** цифровой газовый датчик, токсичный газ, газовый преобразователь, оксид углерода, газоанализатор, система мониторинга, процесс калибровки, газовый генератор.

### Введение

Задача предупреждения и предотвращения опасных ситуаций, связанных с наличием токсичных газов в атмосфере[1-3], является актуальной и своевременной. Для решения этой задачи в настоящее время используют портативные газоанализаторы и стационарные системы мониторинга атмосферы. Во всех этих газоанализаторах применяются различные газовые сенсоры токсичных и горючих газов[4-5]: электрохимические, термокаталитические, полупроводниковые и оптические. Большинство аналоговых газовых чувствительных сенсоров, которые поставляются от производителей, имеют большую погрешность и у них отсутствует нормированный выходной сигнал, однако на промышленных предприятиях требуются газоанализаторы, которые уже прошли поверку и имеют малую погрешность измерения. У многих газоанализаторов токсичных и горючих газов межповерочный интервал составляет всего 1-2 года. При этом все аналоговые чувствительные преобразователи газа различного типа имеют разные аналоговые схемы обработки сигнала, разное

---

напряжение питания, разное потребляемую мощность во время работы и т.д. В настоящее время существует высокая потребность в цифровых газовых датчиках (ЦГД), которые бы исправляли все недостатки аналоговых чувствительных элементов[6-8]. Актуальной задачей является разработка газоанализаторов, удовлетворяющих современным требованиям по быстродействию и точности[9], стабильно функционирующих в условиях возмущающих факторов внешней среды[10].

В рамках работы разработан ЦГД на основе электрохимического аналогового чувствительного элемента. Внешний вид сверху и снизу представлен на рис.1.

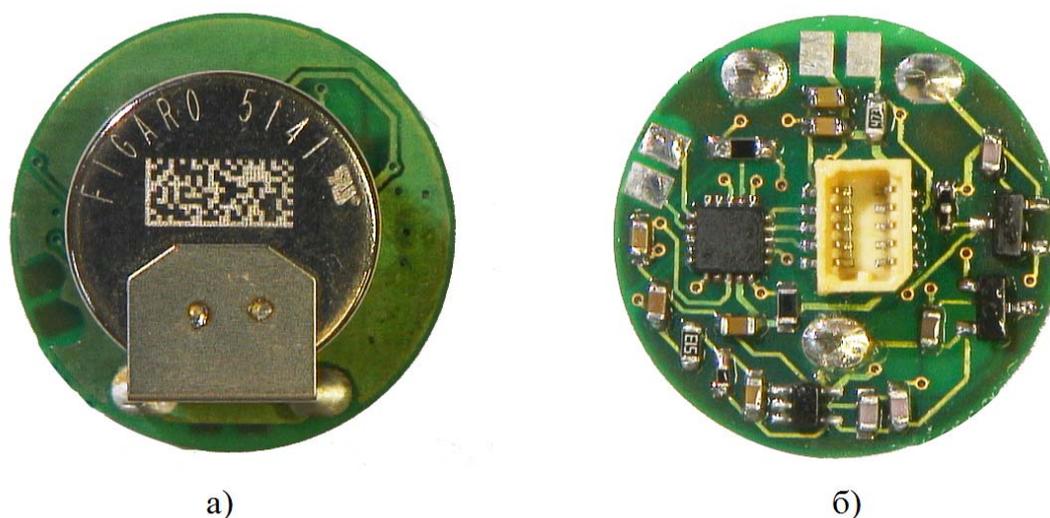


Рис. 1. – Фотографии ЦГД а) вид сверху б) вид снизу на плату цифровой обработки ЦГД

### **Аналоговый чувствительный элемент**

В состав разработанного ЦГД вошел миниатюрный аналоговый электрохимический преобразователь концентрации токсичного газа[11] Figaro TGS5141. Структурная схема аналогового чувствительного элемента представлена на рис. 2. Газочувствительный слой зажат между подложкой из нержавеющей стали с измерительным электродом и крышкой из

---

нержавеющей стали, которая используется как рабочий электрод. В состав также входит защита от избыточной диффузии газа и защитные слои. Для уменьшения перекрестной чувствительности в корпусе электрохимического газового сенсора используется специализированный угольный фильтр, который поглощает и химически реагирует с молекулами определенных посторонних газов.

Аналоговый чувствительный преобразователь позволяет определять концентрацию токсичного газа в широком диапазоне концентрации от 0 до 5000 ppm. Выходной ток преобразователя может составлять от 1.2 до 3.2 нА на 1 ppm определяемого токсичного газа.

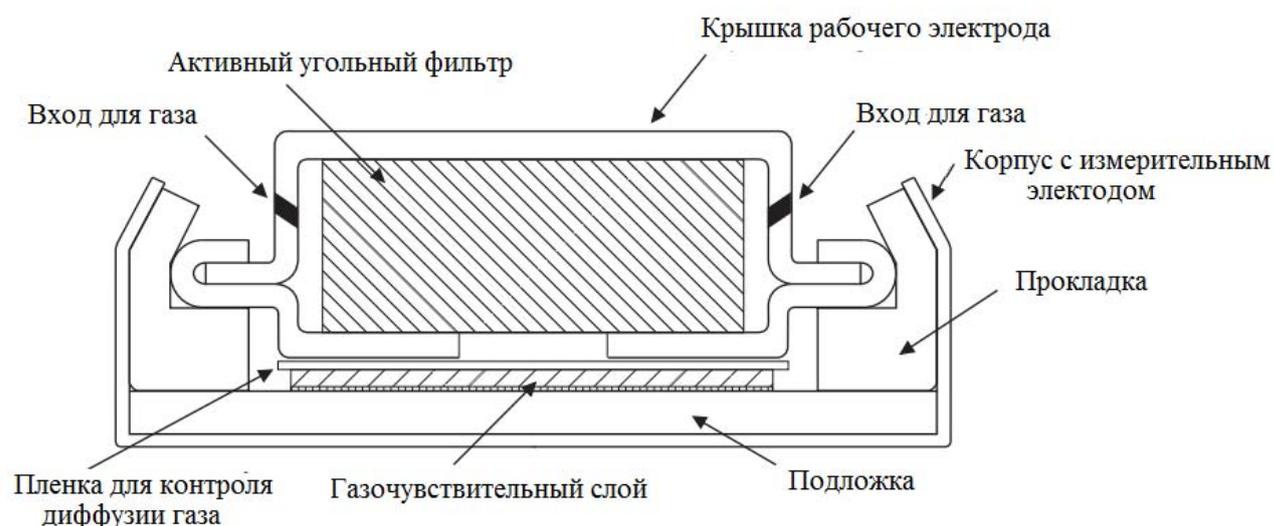


Рис. 2. – Структура аналогового чувствительного элемента

Существует практически линейная зависимость между выходным электрическим током датчика и концентрацией детектируемого токсичного газа. Теоретическая линейная зависимость выходного тока от концентрации газа вычисляется в зависимости от многих компонентов: площади поверхности диффузионной пленки, коэффициента диффузии газа, концентрации газа, толщины диффузионной пленки, одновременного количества электронов, которые участвуют в реакции, постоянной Фарадея.

Для правильного количественного определения концентрации токсичного газа требуется проводить калибровку преобразователя с использованием поверочной газовой смеси (ПГС).

График зависимости выходного тока газового сенсора от концентрации различных газов представлен на рис.3. Как видно из графика, ненормированное значение выходного тока от первичного преобразователя очень сильно влияет на истинные показания концентрации. Красная кривая показывает средний выходной ток для электрохимических ячеек, кривые  $CO_{min}$  и  $CO_{max}$  показываются минимальные и максимальные границы выходного тока.

На рис.4 представлен график температурной зависимости выходного тока сенсора в рабочем диапазоне при концентрации детектируемого газа в 400ppm.

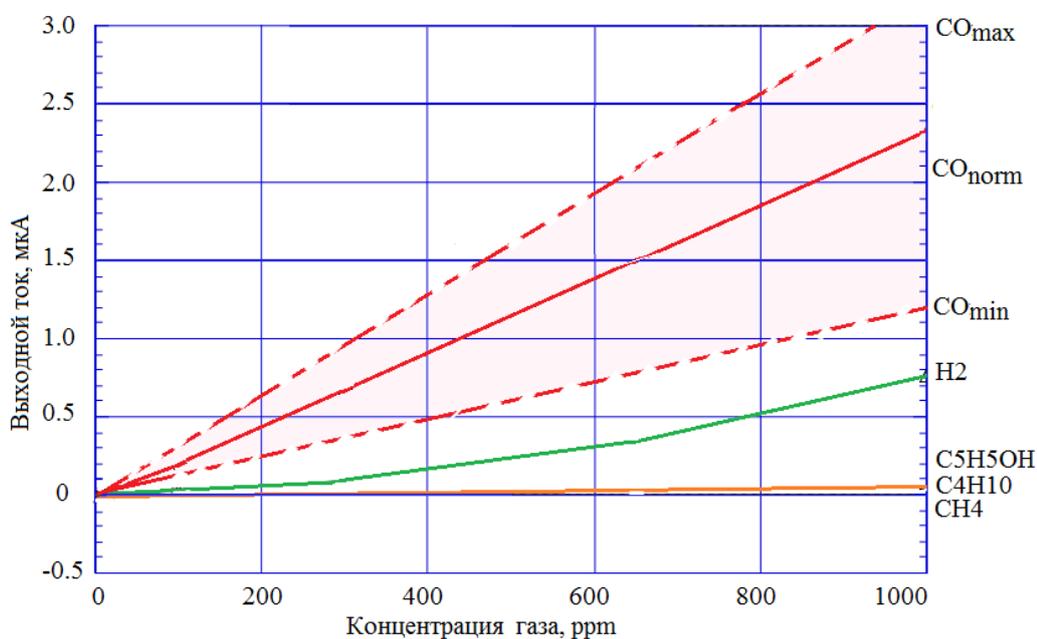


Рис. 3. – Чувствительность сенсора к различным газам

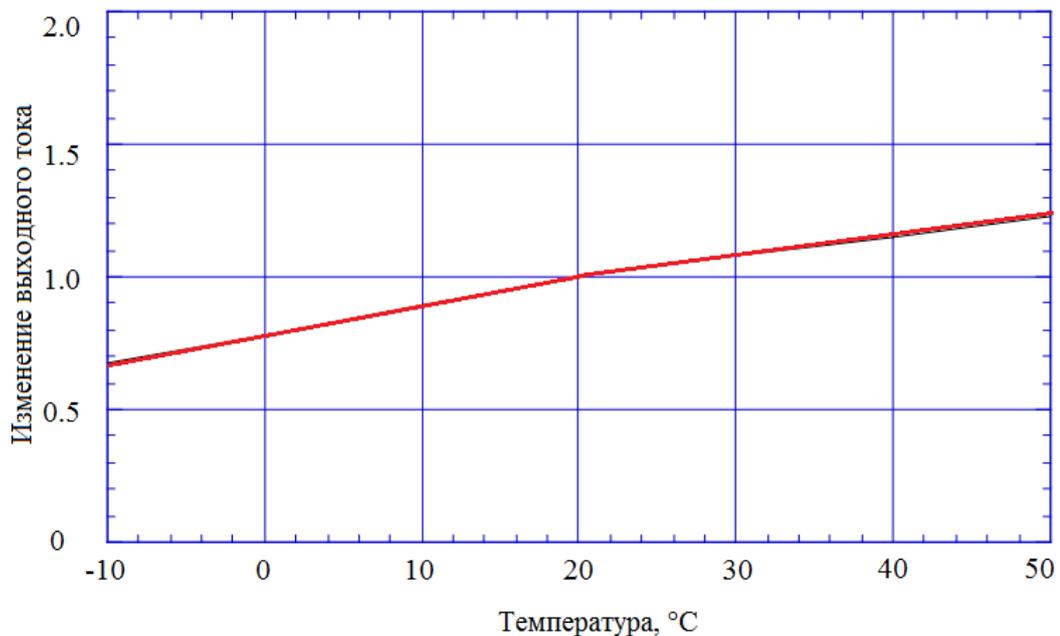


Рис. 4. – Температурная зависимость выходного тока сенсора при концентрации 400 ppm монооксида углерода

Принцип действия аналогового преобразователя в основном идентичен принципу работы остальных электрохимических сенсоров. Когда токсичный газ проходит через газопроницаемую диффузионную мембрану и достигает рабочего электрода, протоны и электроны генерируются в ходе химической реакции окисления токсичного газа. Создавая короткое замыкание между рабочим и противоточным электродами с внешней проводкой, электроны и протоны на рабочем электроде перемещаются на противоэлектрод через внешнюю проводку и через протонный проводник. Затем протон вступает в реакцию с кислородом на противоэлектроде.

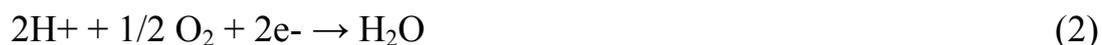
На поверхности рабочего электрода происходит электрохимическая реакция окисления или восстановления. В ионном проводнике возникает движение электронов и на вспомогательном электроде возникает химическая реакция. На вспомогательном электроде протекает противоположная реакция, чем та, которая протекает на рабочем электроде. В результате

электрохимической реакции элемент создает разность потенциалов, являющуюся откликом датчика. Посредством измерения тока между двумя электродами определяется наличие газа.

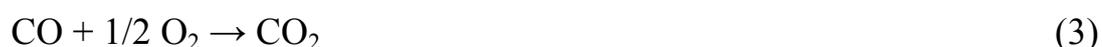
Реакция на рабочем электроде:



Реакция на противоэлектрододе:



Полная реакция:



Так как существует линейная зависимость между током и концентрацией детектируемого газа, датчик может быть откалиброван с использованием газа известной концентрации ПГС. Другие значения концентрации могут быть получены на основе уровня выходного сигнала датчика.

### **Концепция цифровых газовых датчиков**

Для интеграции газовых сенсоров различного типа в составе современных газоанализаторов предлагается использование универсальных ЦГД. Концепция ЦГД предлагает использование вместо аналоговых чувствительных элементов цифровых законченных датчиков с алгоритмами самокоррекции и самокалибровки. ЦГД, созданные на этой концепции, обеспечивают нормированный выходной сигнал, автоматическую температурную коррекцию.

Использование ЦГД в газоанализаторах позволяет автоматически проводить дополнительные операции по калибровке и переконфигурации системы, поскольку все необходимые данные о чувствительности уже содержатся в памяти датчика и могут быть прочитаны с помощью специальных команд протокола. ЦГД включающий аналоговый чувствительный элемент корректирует показания концентрации газа исходя

из вторичных датчиков – температуры и влажности, а также заводских коэффициентов при калибровке. ЦГД в отличие от обычных аналоговых сенсоров имеют стандартный последовательный синхронный цифровой интерфейс SPI и специализированный протокол передачи данных. Что позволяет на один разъем установить любой тип датчика – электрохимический, полупроводниковый, термокаталитический или оптический. Такой подход позволяет значительно упростить использования различных газовых датчиков в одном устройстве и повысить универсальность газоанализаторов.

В рамках проекта разработан миниатюрный малопотребляющий ЦГД (рис.1) на основе предложенной концепции. В состав датчика входит: управляющий миниатюрный микроконтроллер[12] с ядром Cortex-M0 серии STM32L0, блок аналоговой обработки, электрохимический аналоговый чувствительный элемент детектирования монооксида углерода.

Для реализации ЦГД с использованием электрохимического газового сенсора требуется аналоговый блок обработки на основе малопотребляющих операционных усилителей и транзисторов. Как правило, электрохимические ячейки для детектирования токсичных газов бывают с 2-4 электродами. Базовая схема блока аналоговой обработки электрохимического преобразователя с 3 электродами представлена на рис.5. Потенциал рабочего электрода должен поддерживаться таким же, как и потенциал электрода сравнения для датчиков без смещения или с заданным отклонением для датчиков со смещением. Схема для подключения двухэлектродного электрохимического датчика содержит, как правило, лишь один операционный усилитель (DD1), так как не требуется потенциостат (DD2). Операционный усилитель DD1 включается по базовой трансимпедансной схеме для усиления и фильтрации выходного тока электрохимической ячейки. Сопротивление R6 напрямую влияет на величину времени реакции,

---

большая величина сопротивления увеличивает время реакции чувствительного элемента, меньшая увеличивает шум сигнала. Резисторы и конденсаторы ( $R_1, R_2, C_1, C_2$ ) в схеме потенциостата уменьшают шумы сигнала. Комбинация сопротивления  $R_4$  и емкости  $C_3$  определяет верхнюю границу фильтра низких частот. МОП-транзистор JFET с p-каналом ( $VT_1$ ) используется для предотвращения эффекта поляризации чувствительного элемента при длительном хранении, а также для ускорения работы при выходе из «спящего» режима. При выключении питания канал полевого транзистора с управляющим p-n переходом открывается, создавая короткое замыкание между рабочим и вспомогательным электродами. При подаче напряжения питания на устройство, канал полевого транзистора закрывается, и ток от датчика поступает на вход операционного усилителя.

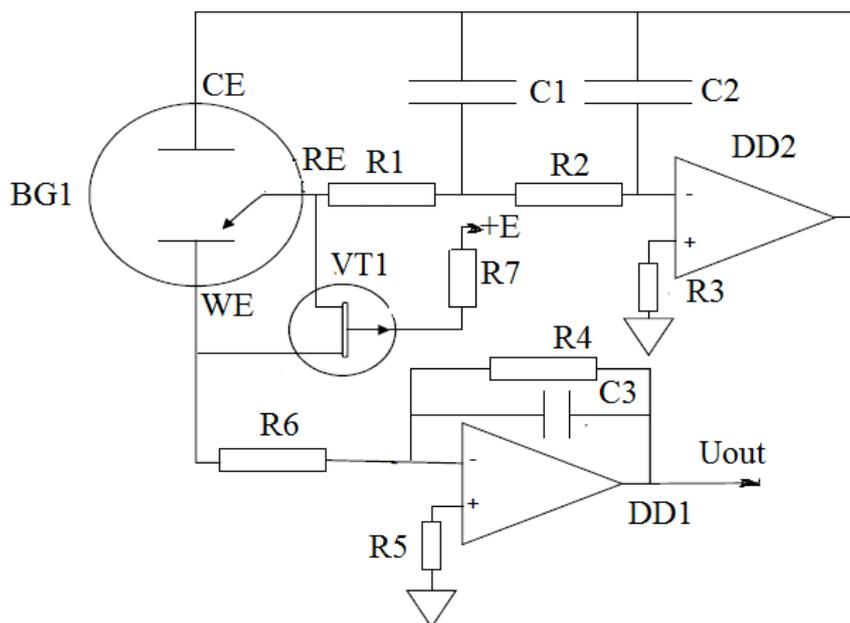


Рис. 5. – Схема аналогового блока обработки 3-х электродного электрохимического газового сенсора

Усиленный выходной сигнал может преобразоваться в цифровой вид с помощью миниатюрного компаратора, выход которого может быть

использован как прерывание для пробуждения микроконтроллера, находящегося большую часть времени в спящем режиме. Выходной аналоговый сигнал с операционного усилителя оцифровывается миниатюрным микроконтроллером, входящим в состав ЦГД.

При разработке ЦГД было создано встроенное программное обеспечение миниатюрного микроконтроллера, входящего в состав ЦГД. Созданное встроенное программное обеспечение реализует энергоэффективный алгоритм работы. В разработанный алгоритм работы входят следующие процессы: инициализация периферии, считывание калибровочных коэффициентов из внутренней памяти, подсчет времени между измерениями, измерение выходного напряжения с аналогового блока обработки, измерение температуры внутреннего датчика температуры, самокалибровка, самодиагностика, измерение напряжения питания, прием и передача данных по SPI и т.д.

В рамках проекта разработан специальный протокол обмена между ЦГД и внешним устройством по SPI. Разработанный алгоритм обработки и преобразования сигнала чувствительных газовых сенсоров содержит описание специальных команд, которые позволяют проводить дополнительные операции по калибровке, переконфигурации и чтению следующих данных с сенсора – готовность сенсора в секундах, оставшийся ресурс в часах, тип датчика, тип газа, единица измерения выходных данных, напряжение питания и т.д.

Специальный протокол разработанного ЦГД состоит из запроса управляющего микроконтроллера газоанализатора и ответа датчика. Запрос состоит из поля стартового байта, байтов команды, байтов данных и контрольной суммы. Ответ сенсора состоит из стартовых байтов, байтов состояния сенсора, байтов данных и контрольной суммы.

---

Каждый цикл обмена информацией между ЦГД и микроконтроллером БЭГ начинается с перевода микроконтроллером линии SS в состояние логического нуля, а заканчивается возвратом в состояние логической единицы. При возникновении ошибки обмена, ЦГД производит многократное повторение цикла обмена. Это необходимо при возникновении ошибки, связанной с воздействием внешних помех на цифровую шину SPI, или при нарушении контакта в разъеме ЦГД. Если ошибка обмена не исчезает, производят однократный сброс ЦГД импульсом низкого уровня по линии RESET цифровой шины.

На рис.6 представлен беспроводной энергонезависимый газоанализатор с использованием микросборки приемопередатчика IEEE 802.15.4 ZigBee[13] с разработанным ЦГД.

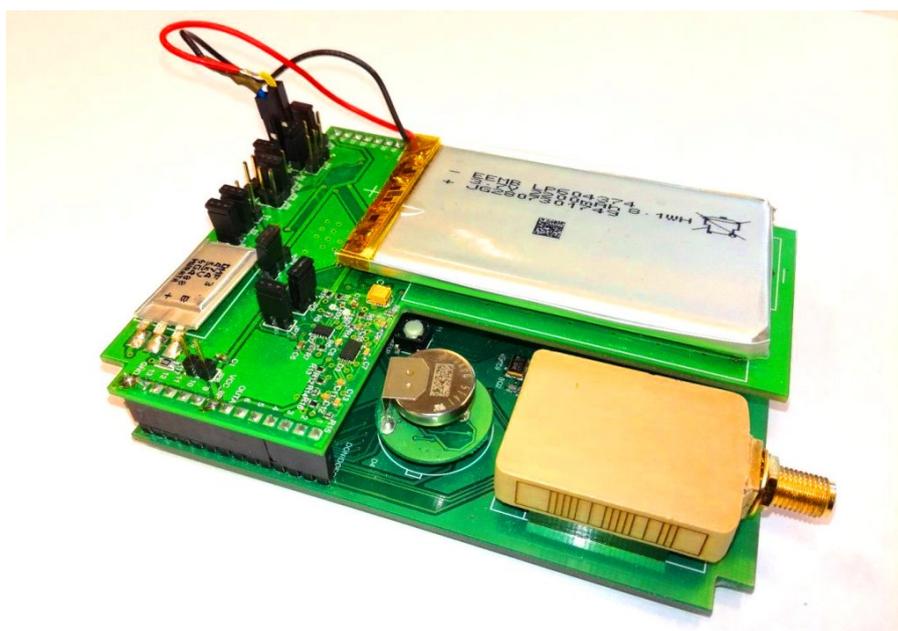


Рис. 6. – Применение разработанного ЦГД в беспроводном энергонезависимом газоанализаторе, включающем микросборку приемопередатчика

## Калибровка цифрового газового датчика

Калибровка ЦГД для получения данных о чувствительности аналоговых преобразователей может проводиться тремя разными способами: с помощью ПГС из баллонов, с помощью термодиффузного разбавительного генератора газа или с помощью дозатора жидкости с газовой камерой известного объема. Для поверки и записи данных о характеристиках аналогового чувствительного элемента в память ЦГД, была применена специализированная газодинамическая установка для приготовления газовых и парогазовых смесей с заданным содержанием компонентов. Используемая установка имеет генераторы газовых смесей универсального типа – разбавительного и термодиффузионного. Принцип работы диффузной газодинамической установки основан на введении в воздушный поток источника микропотока исследуемого газа с известной величиной испарения вещества через стенки фторопластовой ампулы-источника микропотока. Газовое питание генератора происходит от баллона со сжатым воздухом через понижающий редуктор. От генератора на диффузную газодинамическую установку газовая смесь с известной концентрацией газа подается по фторопластовому трубопроводу, соединяемому коротким шлангом со штуцером насадки.

Во время операции калибровки и записи коэффициентов в память микроконтроллера ЦГД требуется учитывать большое количество особенностей. При калибровке ЦГД требуется учитывать относительную погрешность  $\delta_{ci}$  (%) заданного значения концентрации  $i$ -го компонента в ПГС, который подается на чувствительный элемент, которая вычисляется по формуле:

$$\delta_{ci} = 100 \times \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m \left( \frac{\delta g_k}{100} \times g_k \right)^2}{\left( \sum_{k=1}^m g_k \right)^2} + \frac{\sum_{j=1}^n \left( \frac{\delta q_j}{100} \times q_j \right)^2}{\left( \sum_{j=1}^n q_j \right)^2}} \quad (4)$$

где  $C_i$  – концентрация  $i$  – го компонента в приготавливаемой ПГС, мкг/мин;

$m$  – количество ИМП с  $i$  – компонентом, использующихся для получения ПГС;

$\delta g_k$  – паспортная относительная доверительная погрешность производительности  $i$  – го компонента из  $k$  – го ИМП, %;

$g_k$  – значение производительности  $k$  – го ИМП по  $i$  – му контрольному компоненту, мкг/мин;

$\delta q_j$  – пределы допускаемых относительных погрешностей поддержания заданных значений расходов в каналах формирования газовых потоков, использующихся для подачи газов-разбавителей, %;

$q_j$  – заданные значения объемных расходов газов – разбавителей (ПГС<sub>0</sub>, ПНГ и др.), приведенные к стандартным условиям, мл/мин;

$n$  – количество формирования газовых потоков, использующихся для подачи газов – разбавителей.

При калибровке ЦГД требуется учитывать внутренние шумы операционных усилителей (DD1 на рис.5) с коэффициентом усиления  $NG$  операционного усилителя при неинвертирующем включении:

$$NG = 1 + \frac{R_4}{R_6} \quad (5)$$

В таком случае напряжение шумов на выходе  $V_{outnoise}$  будет равно:

$$V_{outnoise} = e_n \cdot \left( 1 + \frac{R_4}{R_6} \right) \quad (6)$$

где  $e_n$  – среднеквадратичное напряжение шумов в заданном диапазоне частот. В итоге  $V_{out}$  – выходное напряжение, получаемое на входе АЦП микроконтроллера, будет вычисляться по формуле:

$$V_{out} = \sqrt{\left( V_{in} \cdot \left( 1 + \frac{R_4}{R_6} \right)^2 + \left[ e_n + \left( 1 + \frac{R_4}{R_6} \right) \right]^2 \right)} \quad (7)$$

где  $V_{in}$  – напряжение смещения.

### Заключение

Разработанный ЦГД на основе миниатюрного микроконтроллера отличается низким энергопотреблением, что способствует обеспечению увеличения времени работы для газоанализаторов с аккумуляторами. В отличие от аналоговых датчиков, разработанный ЦГД является калиброванным средством измерения и обеспечивает автоматическую температурную коррекцию и самодиагностику. При смене ЦГД в газоанализаторе не требуется проводить дополнительные операции по калибровке и переконфигурации системы, поскольку все необходимые данные содержатся в памяти датчика и могут быть прочитаны с помощью специальных команд. Разработанный ЦГД может применяться в стационарных системах безопасности на промышленных объектах.

Работы выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Соглашение № 14.577.21.0225, уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57716X0225).

### Литература

1. Беляев Н.Н., Гунько Е.Ю., Решетняк Т.П. Численное моделирование затекания токсичного газа в помещение при аварии на промплощадке химически опасного объекта // Наука и прогресс транспорта. Вестник

Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2011. №36. С. 141-146.

2. Курсов С.В. Монооксид углерода: физиологическое значение и токсикология // МНС, 2015, №6 (69), URL: [cyberleninka.ru/article/n/monoosid-ugleroda-fiziologicheskoe-znachenie-i-toksikologiya](http://cyberleninka.ru/article/n/monoosid-ugleroda-fiziologicheskoe-znachenie-i-toksikologiya).

3. Пшинько А.Н., Беляев Н.Н., Покутнева Л.В. Моделирование загазованности общественного помещения токсичным газом // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта, 2009, №26. URL: [cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-zagazovannosti-obschestvennogo-pomescheniya-toksichnym-gazom](http://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-zagazovannosti-obschestvennogo-pomescheniya-toksichnym-gazom).

4. Маршалл В. Основные опасности химических производств: пер. с англ. –М.: Мир, 1989, С. 672.

5. Бесчастнов М.В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение. – М.: Химия, 1991, С. 432.

6. Sukhanov A.V. Development of Autonomous Wireless Sensor Node for Control of the Gas Environment on Industrial Facilities. International Journal of Pharmacy & Technology. 2016, Vol.8, No.3, pp.15318-15326.

7. Sukhanov A.V., Artemova A.I., Ivanov A.V. Development of Autonomous Sensor Node Using Gas Sensor for Systems of Industrial Safety And Ecological Monitoring. International Journal of Applied Engineering Research, ISSN 0973-4562 Volume 10, Number 21 (2015) pp. 42672-42676.

8. Суханов А.В., Прокофьев И.В, Иванов А.В. Универсальная цифровая платформа для построения самоорганизующихся беспроводных сенсорных сетей для систем промышленной безопасности и экологического мониторинга // Микроэлектроника. 2016. Том 45. № 2. С. 144–148.

9. Беляев А.О., Легин А.А. Исследование вариантов организации беспроводного взаимодействия приборов учета в составе комплекса учета

---

энергоресурсов // Инженерный вестник Дона, 2016, №4, URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_85\\_Belyaev\\_Legin.pdf\\_e14aa106c1.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_85_Belyaev_Legin.pdf_e14aa106c1.pdf).

10. Рындин Е.А., Леньшин А.С. Методика численного моделирования спектрометрических газочувствительных сенсорных систем // Инженерный вестник Дона, 2012, №4 (часть 2), URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1360/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1360/).

11. TGS 5141 - for the detection of Carbon Monoxide // Figaro (Japan, Osaka), URL: [figaro.co.jp/en/product/docs/tgs5141\\_product%20infomation%28en%29\\_rev04.pdf](http://figaro.co.jp/en/product/docs/tgs5141_product%20infomation%28en%29_rev04.pdf).

12. Ultra-low-power ARM Cortex-M0+ MCU with 16-Kbytes Flash, 32 MHz CPU // STMicroelectronics (Switzerland, Geneva), URL: [st.com/resource/en/datasheet/stm321011f4.pdf](http://st.com/resource/en/datasheet/stm321011f4.pdf).

13. Wheeler Commercial Applications of Wireless Sensor Networks Using ZigBee // IEEE Communication Magazine, 2007, 45(4). pp. 70–77.

### References

1. Beljaev, N.N., Gun'ko, E.Ju., Reshetnjak, T.P. Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo nacional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta. 2011. №36. pp. 141-146.

2. Kursov S.V. MNS, 2015, №6 (69), URL: [cyberleninka.ru/article/n/monooksid-ugleroda-fiziologicheskoe-znachenie-i-toksikologiya](http://cyberleninka.ru/article/n/monooksid-ugleroda-fiziologicheskoe-znachenie-i-toksikologiya).

3. Pshin'ko A. N., Beljaev N. N., Pokutneva L. V. Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo nacional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta, 2009, №26. URL: [cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-zagazovannosti-obschestvennogo-pomescheniya-toksichnym-gazom](http://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-zagazovannosti-obschestvennogo-pomescheniya-toksichnym-gazom).

4. Marshall V. Osnovnye opasnosti himicheskikh proizvodstv: per. s angl. [The main hazards of chemical production: transl. from English.] M. Mir, 1989, p. 672.

5. Beschastnov M.V. Promyshlennye vzryvy. Ocenka i preduprezhdenie. [Industrial explosions. Evaluation and warning]. M. Himiya, 1991, p. 432.
6. Sukhanov A.V. Development of Autonomous Wireless Sensor Node for Control of the Gas Environment on Industrial Facilities. International Journal of Pharmacy & Technology. 2016, Vol.8, No.3, pp.15318-15326.
7. Sukhanov A.V., Artemova A.I., Ivanov A.V. Development of Autonomous Sensor Node Using Gas Sensor for Systems of Industrial Safety And Ecological Monitoring. International Journal of Applied Engineering Research, ISSN 0973-4562 Vol. 10, No 21 (2015) pp. 42672-42676.
8. Suhanov A.V., Prokof'ev I.V., Ivanov A.V. Mikrojelektronika. 2016. Tom 45. № 2. pp. 144–148.
9. Belyaev A.O., Legin A.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2016. №4. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_85\\_Belyaev\\_Legin.pdf\\_e14aa106c1.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_85_Belyaev_Legin.pdf_e14aa106c1.pdf).
10. Ryndin E.A., Len'shin A.S. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №4. (chast' 2) URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1360/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1360/).
11. TGS 5141 - for the detection of Carbon Monoxide. Figaro (Japan, Osaka), URL: [figaro.co.jp/en/product/docs/tgs5141\\_product%20infomation%28en%29\\_rev04.pdf](http://figaro.co.jp/en/product/docs/tgs5141_product%20infomation%28en%29_rev04.pdf).
12. Ultra-low-power ARM Cortex-M0+ MCU with 16-Kbytes Flash, 32 MHz CPU. STMicroelectronics (Switzerland, Geneva). URL: [st.com/resource/en/datasheet/stm321011f4.pdf](http://st.com/resource/en/datasheet/stm321011f4.pdf).
13. Wheeler Commercial Applications of Wireless Sensor Networks Using ZigBee. IEEE Communication Magazine, 2007, 45(4). pp. 70–77.