

Методы и алгоритмы управления термокаталитическим датчиком водорода

О. Г. БОНДАРЬ, Е. О. БРЕЖНЕВА, В. В. ПОЗДНЯКОВ

Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия, e-mail: b.og@mail.ru, bregnevaeo@mail.ru, zoomerillo@gmail.com

Рассмотрены методы и алгоритмы управления работой термокаталитического датчика газа. Применение данных методов и алгоритмов позволяет уменьшить погрешности измерения и увеличить срок службы датчика.

Ключевые слова: термокаталитический датчик газа, водород, температурная стабилизация, микроконтроллер, чувствительный элемент, опорное сопротивление.

The method of control and the algorithm of catalytic gas-sensitive sensor operation for decreasing measurement errors and an increasing sensor life were considered.

Key words: thermocatalytic gas sensor, hydrogen, temperature stabilization, microcontroller, sensitive element, reference resistor.

При использовании термокаталитических датчиков водорода [1] в газоанализаторах значительными проблемами являются выгорание катализатора в случае повышенной концентрации газа, высокая нелинейность при концентрациях выше 50 % нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПРП). Воздействие горючих газов на чувствительный элемент термокаталитического датчика водорода в мостовом включении приводит к существенному изменению температуры датчика по отношению к температуре компенсирующего элемента. Таким образом нарушаются условия компенсации влияния температуры окружающей среды, обусловленного различиями температурных коэффициентов сопротивления холодного компенсационного и горячего чувствительного элементов, уменьшается температурная чувствительность и возникает различие коэффициентов теплового рассеяния. Кроме того, изменение температуры чувствительного элемента приводит к изменению скорости протекания реакций горения, а значит, к дополнительной нелинейности функции преобразования датчика. Температура чувствительного элемента при концентрациях более 50 % НКПРП может превышать 1000 °С, из-за чего происходят постепенное окисление катализатора, растрескивание капсулы с нанесённым катализатором и выход датчика из строя.

Для устранения эффектов, отрицательно влияющих на характеристики и срок эксплуатации датчика при мостовом включении, используется изотермический режим. Впервые изотермический режим применялся для аналоговой схемотехники [2]. Однако реализация этого режима на аналоговой элементной базе весьма громоздкая, при замене датчика необходимо заново проводить настройку нулевых показаний и чувствительности. Также сложно создать портативный датчик с индикацией точной концентрации газа.

В [3] представлена конструкция газоанализатора, предусматривающая управление мощностью подогрева датчика методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Генератор

ШИМ поддерживает заданную температуру датчика путём уменьшения или увеличения коэффициента заполнения при изменении содержания определяемого компонента. При этом изменяется электрическая мощность, приложенная к датчику, а измеряемым параметром является величина, пропорциональная электрическому сопротивлению датчика. Недостаток данной конструкции заключается в отсутствии компенсации изменяющихся параметров среды. Температура датчика будет изменяться при вариациях температуры окружающей среды, что отразится на выходных показаниях датчика, даже если содержание определяемого компонента было постоянным.

Наиболее перспективным является газоанализатор с датчиком на основе цифрового электронного устройства – микроконтроллера [4]. Реализация изотермического метода на основе микроконтроллера упрощается и удешевляется благодаря применению программного обеспечения. Это позволяет уменьшить составляющую погрешности, связанную с колебаниями температуры окружающей среды, получить практически линейную характеристику преобразования во всём рабочем диапазоне измеряемых концентраций газа, обеспечить автоматическую компенсацию смещения, снизить стоимость и уменьшить массогабаритные размеры готового датчика. При использовании микроконтроллера и импульсного режима питания преобразователя можно не только реализовать изотермический режим, но и получить дополнительные функциональные возможности. Подобное устройство для измерения концентрации метана представлено в [5].

На рис. 1 приведена структурная схема газоанализатора. Для поддержания стабильной и одинаковой температуры чувствительного и компенсационного элементов датчика D их подогрев осуществляется импульсами, формируемыми ключами $Kл1$, $Kл2$. При этом импульсы тока подогрева не перекрываются. Через интервал времени, достаточный для завершения переходного процесса коммутации, при включении

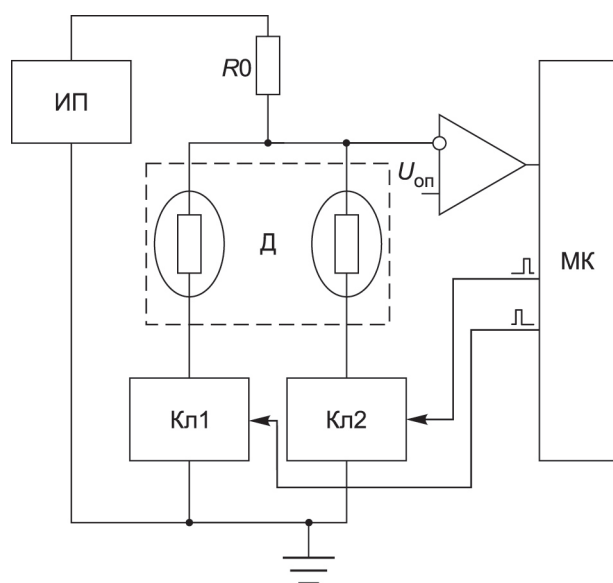


Рис. 1. Структурная схема газоанализатора с термокаталитическим датчиком водорода:

ИП – источник питания; Д – датчик; МК – микроконтроллер, работающий в изотермическом режиме; Кл1, Кл2 – ключи; R0, $U_{оп}$ – опорные резистор и напряжение

ключа Кл1, осуществляется сравнение напряжения на опорном резисторе R_0 с опорным напряжением $U_{оп}$, соответствующим номинальной температуре элемента. При отклонении напряжения от номинального значения длительность t_1 импульса, управляющего ключом Кл1, в следующем периоде будет изменена. При управлении ключом Кл2 аналогичным образом варьируется длительность t_2 импульса. Стабилизация напряжения на опорном резисторе эквивалентна стабилизации температуры чувствительного и компенсационного элементов датчика.

В каждом периоде вычисляется разность коэффициентов заполнения ШИМ t_1-t_2 . Значения разности накапливаются в течение заданного количества N периодов ШИМ длительностью τ . По завершении интервала накопления $N\tau$ сумма этих значений разности нормируется по отношению к интервалу $N\tau$ и представляет собой разность ΔD средних значений коэффициентов заполнения [6]:

$$\Delta D = \sum_{i=1}^N (t_{1i} - t_{2i}) / (N\tau).$$

При отсутствии определяемого компонента эта разность является смещением ΔD_0 , которое определяется различием сопротивлений и коэффициентов теплоотдачи чувствительного и компенсирующего элементов.

При появлении горючего газа чувствительный элемент датчика нагревается за счёт реакции окисления, протекающей на его поверхности, а система стабилизации уменьшает длительность импульсов подогрева чувствительного элемента. Скорректированная разность средних значений коэффициентов заполнения пропорциональна мощности,

выделяемой при химической реакции, и, следовательно, концентрации C детектируемого газа:

$$C = K(\Delta D - \Delta D_0),$$

где K – коэффициент пропорциональности; C измеряется в процентах НКПРП.

С помощью таймеров микроконтроллера формируются ШИМ-импульсы управления ключами Кл1, Кл2 в смежных периодах. Сравнение с опорным напряжением может осуществляться встроенным компаратором. Для измерения напряжения на опорном резисторе используется встроенный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), что позволяет легко изменять значение $U_{оп}$. Поскольку напряжение $U_{оп}$ стабилизируется вблизи одного значения, то влиянием дифференциальной и интегральной нелинейностей, аддитивной и мультипликативной погрешностей АЦП на результаты измерений можно пренебречь. Время преобразования АЦП может превышать длительность импульса подогрева, что не мешает корректному измерению в связи с малостью времени выборки встроенной схемы выборки – хранения.

При изменении температуры окружающей среды длительности импульсов подогрева изменяются одновременно на одно и то же значение [7], поэтому смещение ΔD_0 остаётся постоянным. Частота следования импульсов подогрева выбирается так, чтобы за период следования изменение напряжения на опорном сопротивлении из-за изменения сопротивлений элементов датчика не превышало шага квантования АЦП или разрешающей способности компаратора.

Для исследования режимов работы термокаталитического датчика водорода и нахождения частоты импульсов подогрева был разработан прототип газоанализатора [6]. На рис. 2 показана схема подключения одного элемента термокаталитического датчика водорода. Выбор частоты следования осуществлён по зависимости, приведённой на рис. 3, экспериментально полученной на прототипе газоанализатора. Данная экспериментальная кривая является диаграммой зависимости сопротивления подогревателя (платиновая спираль) от длительности импульса подогрева при подключении подогревателя к источнику тока, управляемого ШИМ, встроенным в микроконтроллер.

Транзистор VT1 с низким сопротивлением канала (30 мОм) коммутирует цепь датчика Д (см. рис. 2). Напряжение на опорном резисторе R_0 измеряется встроенным 10-битовым АЦП микроконтроллера МК и через универсальный асинхронный приёмопередатчик TX/RX и конвертер сигналов USB/UART передаётся в персональный компьютер ПК.

Номинальная температура элементов датчика составляет 300 °С, номинальное сопротивление рассчитывается по формуле

$$R_3 = R_{30}(1 + AT + BT^2) = 5,51 \text{ Ом},$$

где R_3 – номинальное сопротивление элемента датчика при температуре $T=300$ °С; $R_{30} = 2,601$ Ом – сопротивление элемента датчика при $T=0$; $A = 3,9083 \cdot 10^{-3}$, $B = -5,755 \cdot 10^{-7}$ – константы, нормированные в стандарте [8].

Для выбранного напряжения питания цепи датчика $U_{\text{пит}} = 5 \text{ В}$ скорость изменения сопротивления равна $0,01 \text{ Ом/мс}$ (см. рис. 3). Таким образом, вблизи значений рабочего диапазона сопротивлений датчика при отсутствии водорода относительная скорость изменения сопротивления не превышает $0,2 \text{ \%/мс}$, скорость изменения напряжения на опорном резисторе составляет $0,1 \text{ \%/мс}$. Это соответствует шагу квантования десятиразрядного АЦП. С учётом шага квантования АЦП период ШИМ $T \leq 1 \text{ мс}$, поэтому частота квантования должна быть не ниже 1 кГц . Это гарантирует пульсации напряжения от периода к периоду не более $0,1 \text{ \%}$. При необходимости уменьшения пульсаций необходимо пропорционально уменьшить период ШИМ.

Для датчика NP-AHS (Nemoto, Япония) среднее значение чувствительности к водороду составляет $100 \text{ мВ/\% об. H}_2$. Изменение ΔU напряжения симметричной измерительной цепи при относительном изменении сопротивления чувствительного элемента датчика определяется выражением

$$\Delta U = 0,25 U_{\text{пит}} \varepsilon,$$

где $\varepsilon = \Delta R/R$ – относительное изменение сопротивления датчика при изменении концентрации газа.

При том же напряжении питания размах напряжения пульсаций не превысит $0,8 \text{ мВ}$, а амплитуда – $0,4 \text{ мВ}$. Это соответствует погрешности измерений концентрации водорода $\pm 40 \text{ млн}^{-1}$, что существенно меньше погрешности $\pm 200 \text{ млн}^{-1}$, заявленной производителем датчика NP-AHS.

Прототип газоанализатора содержит 8-битовый микроконтроллер ATmega168 (Atmel, США). В качестве источника опорного напряжения десятиразрядного АЦП используется цепь питания датчика, что ослабляет влияние нестабильности напряжения питания на результаты измерений. Для реализации быстрой ШИМ служит встроенный в МК 16-битный таймер-счётчик с двумя каналами сравнения и автоматическим управлением выходами каждого канала. Ключи построены на полевых транзисторах с изолированным затвором International Rectifier IRF7311 с сопротивлением канала не более 30 мОм .

Для получения максимальной чувствительности датчика сопротивление эталонного резистора R_0 выбирается равным сопротивлению чувствительного элемента датчика R_3 в номинальном режиме:

$$R_0 = R_3 = 5,5 \text{ Ом}.$$

При этом амплитуда импульса тока в установившемся режиме при напряжении питания 5 В составит

$$I_{5\text{В}} = U / (R_3 + R_0) = 0,45 \text{ А},$$

а мощность подогрева во время импульса напряжения 5 В :

$$P_3 = I_{5\text{В}}^2 R_3 = 2,25 \text{ Вт}.$$

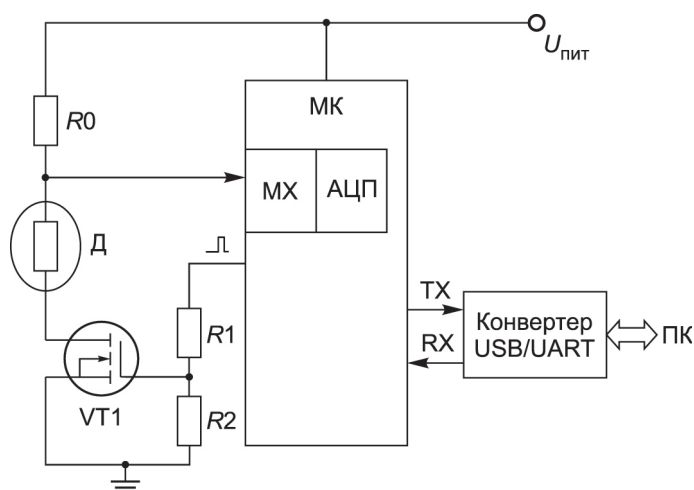


Рис. 2. Схема подключения компенсационного элемента термокаталитического датчика водорода к прототипу газоанализатора: VT1 – транзистор; D – датчик; МК – микроконтроллер; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; TX/RX – универсальный асинхронный приёмопередатчик; USB/UART – конвертер сигналов; ПК – персональный компьютер

Номинальная мощность подогрева при температуре $300 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$P_{300} = I_{0,8\text{В}}^2 R_3 = 0,115 \text{ Вт},$$

где $I_{0,8\text{В}}$ – сила тока при напряжении питания $0,8 \text{ В}$.

Длительность импульса подогрева до $300 \text{ }^\circ\text{C}$ при $U = 5 \text{ В}$ определяется из соотношения

$$t_{\text{и}} = P_{300} \tau / P_3 = 0,103 \text{ мс}, \tau = 1 \text{ мс}.$$

На рис. 4 приведены временные диаграммы импульсов подогрева элементов термокаталитического датчика водорода. При данных значениях длительности и частоты следования импульсов колебания температуры рабочего элемента датчика будут незначительными, что подтверждено экспериментальными данными, полученными при работе датчика в слу-

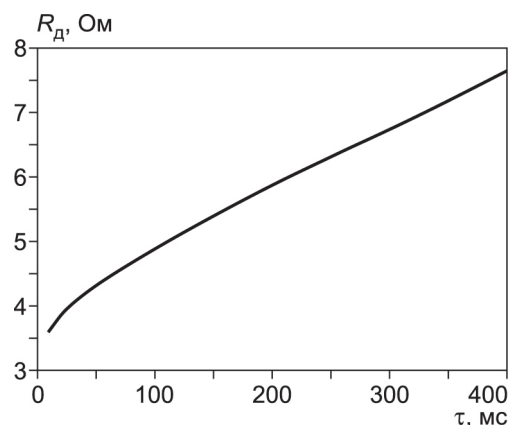


Рис. 3. Зависимость сопротивления R_d подогревателя датчика от времени τ при включении подогрева; шаг дискретизации 10 мс

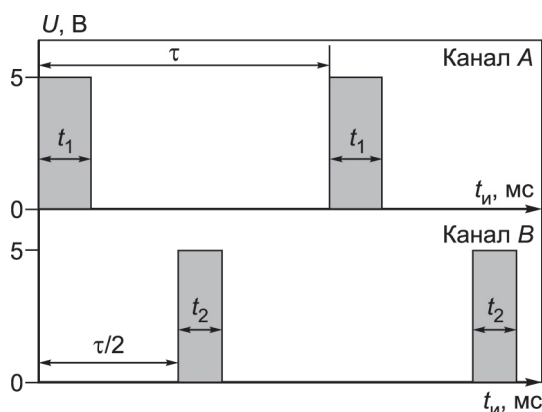


Рис. 4. Временные диаграммы работы термокаталитического датчика водорода в изотермическом режиме

чае отсутствия определяемого компонента. Периодам ШИМ с номерами 1–7 соответствовали следующие коды АЦП: 491, 492, 491, 491, 490, 491, 493. В соседних периодах падение напряжения на элементе датчика отличается максимум на 2 единицы младшего разряда АЦП, т. е. в рассматриваемом случае на 0,0097 В, следовательно, сопротивление отличается на 0,04 Ом и температура – примерно на 5 °С.

Заключение. Предлагаемый метод управления мощностью подогрева термокаталитического датчика водорода с микроконтроллером в контуре стабилизации температуры чувствительного и компенсационного элементов позволяет следующее:

уменьшить погрешности, связанные с колебаниями температуры окружающей среды, вследствие постоянства температуры катализатора, идентичности и постоянства температурных коэффициентов элементов датчика;

получить практически линейную характеристику преобразования во всём рабочем диапазоне измеряемых концентраций газа. Это возможно благодаря стабильности условий протекания реакции каталитического окисления на поверхности чувствительного элемента при стабильности его температуры, а также из-за того, что не изменяются сопротивление (и, следовательно, чувствительность) делителя, образованного элементами датчика и опорным резистором, и температурный коэффициент сопротивления чувствительного элемента (все перечисленные факторы имеют место в классической схеме включения [8]);

повысить надёжность датчика за счёт исключения термочиклирования. Это достигается выбором частоты импульсного режима подогрева, позволяющей с требуемой точностью гарантировать стабильность сопротивления (и, следовательно, температуры) за период ШИМ (режим работы датчика не является динамическим);

обеспечить автоматическую компенсацию смещения. Это

реализуется измерением смещения по сигналу калибровки при отсутствии определяемого компонента в среде или понижением температуры элементов с целью остановки реакции термокаталитического окисления с последующим измерением и пересчётом смещения к рабочей температуре в автоматическом режиме;

снизить стоимость датчика и, соответственно, газоанализатора в целом.

Данный метод можно применять как для одноконпонентных, так и многокомпонентных газоанализаторов с каталитическими датчиками, базирующихся на совместной обработке с использованием алгоритмов искусственных нейронных сетей [9] сигналов нескольких датчиков с разной избирательностью к компонентам газовой смеси.

Л и т е р а т у р а

1. Hübner T., Boon-Brett L., Black G., Banach U. Hydrogen sensors – A review // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2011. P. 331–332.
2. Manginell R. P., Smith J. H., Ricco A. J., Hughes R. C., Moreno D. J. Electro-thermal modeling of a microbridge gas sensor. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 1997. P. 360–371.
3. Пат. 2304278 РФ. Способ стабилизации параметров микронагревателя измерительного элемента газового датчика и устройство для его осуществления / Гогиш-Клушин С. Ю., Ельчанин А. В., Харитонов Д. Ю. // *Изобретения. Полезные модели*. 2007. № 8.
4. Брежнева Е. О., Бондарь О. Г., Полякова А. В. Применение микроконтроллера для температурной стабилизации полупроводниковых газочувствительных датчиков // *Датчики и системы* 2014. № 2. С. 41–46.
5. 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. V. 120. P. 1019–1023.
6. Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Поздняков В. В. Реализация изотермического режима термокаталитических газочувствительных датчиков // *Датчики и системы* 2016. № 2. С. 43–47.
7. Брежнева Е. О., Бондарь О. Г. Изотермический режим газочувствительных каталитических датчиков // *Известия ЮЗГУ*. 2012. Ч. 3. № 2(41). С. 27–31.
8. ГОСТ 6651–94. Термопреобразователи сопротивления. Общие технические требования и методы испытаний.
9. Дрейзин В. Э., Брежнева Е. О., Бондарь О. Г. Устройство обработки сигналов многокомпонентного газоанализатора // *Приборы и Системы. Управление, контроль, диагностика*. 2011. № 12. С. 43–48.

Дата принятия: 03.11.2017.