

УДК 519.688

М.С. Ермаков

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА КАЛИБРОВКИ И ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО КОМПЕНСИРОВАНИЯ ПОКАЗАНИЙ ГАЗОВОГО ДАТЧИКА НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ОЛОВА

*Ермаков Михаил Сергеевич, кандидат физико-математических наук, окончил инженерно-физический факультет высоких технологий Ульяновского государственного университета. Инженер 1 категории ФНПЦ АО «НПО «Марс». Специализируется в области создания и развития автоматизированных измерительных систем. Имеет статьи и другие публикации в области анализа полупроводниковых приборов. [e-mail: ermakov@pisem.net].*

### Аннотация

Особенностью сенсоров на основе диоксида олова являются высокая чувствительность, простота конструкции и сравнительно низкая цена. Основным недостатком этих сенсоров является плохая избирательность.

Для исследования выбран газовый датчик на основе диоксида олова, как типичный представитель сенсоров адсорбционного типа.

Статья посвящена проблеме калибровки и повышения точности газовых датчиков на основе диоксида олова, широко применяемых в системах контроля состава газовых сред.

В работе разрабатываются алгоритмы калибровки и температурно-влажностного компенсирования показания газового датчика, которые позволяют калибровать подобные датчики без применения сложного оборудования, а также производить корректировку их показаний в зависимости от температуры и влажности окружающей среды. Разработанные алгоритмы увеличивают точность показаний датчика на основе диоксида олова. Предложенные технические решения основаны на известных подходах к калибровке и коррекции датчиков и конкретизируют эти результаты применительно к датчику типа MQ-135.

Ключевые слова: газовый сенсор, диоксид олова, калибровка, температурно-влажностная компенсация.

## THE DEVELOPMENT OF THE ALGORITHM FOR CALIBRATION AND TEMPERATURE-HUMIDITY COMPENSATION OF THE GAS SENSOR READOUT ON THE BASIS OF THE STANNIC OXIDE

*Mikhail Sergeevich Ermakov, Candidate of Physics and Mathematics; graduated from the Faculty of Physics and High Technology Engineering of Ulyanovsk State University; Engineer at Federal Research and Production Center Joint Stock Company 'Research-and-Production Association 'Mars'; specializes in the field of building and developing automated measuring systems; an author of articles and papers in the field of semiconductor devices analysis. e-mail: ermakov@pisem.net.*

### Abstract

The distinctive features of sensors on the basis the stannic oxide are high sensitivity, simple structure and the relatively low price. The main disadvantage of the sensors is the poor selectivity.

Within the research, the gas sensor on the basis of the stannic oxide as a typical representative of the adsorption type sensors is chosen.

The article discusses the calibration and improvement in the accuracy of gas sensors on the basis of the stannic oxide that are widely used in systems designated for the gaseous atmosphere composition control.

The algorithms for calibration and temperature-humidity compensation of the gas sensor readout are developed. The algorithms allow to calibrate these sensors without using the complex equipment as well as to correct their readout depending on the temperature and humidity of the environment. The developed algorithms increase the readout accuracy of the sensor on the basis the stannic oxide. The proposed solutions are based on well-known approaches to sensor calibration and correction. The solutions also concretize the results relating to the MQ-13type of sensor.

Key words: gas sensor, stannic oxide, calibration, temperature-humidity compensation.

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальной задачей является разработка систем для контроля и анализа состава различных газовых сред. Вредные газы попадают в воздух в результате сжигания топлива для нужд промышленности, отопления жилищ, работы транспорта, сжигания и переработки бытовых и промышленных отходов.

Для контроля газовой обстановки используются датчики, работающие на различных физических принципах: оптических, адсорбционных, химических и т. д. Из всей номенклатуры датчиков, изготавливаемых по микроэлектронной технологии, наиболее широко представлен класс устройств, работающих на основе адсорбционных эффектов, возникающих на поверхности оксида металла, катализирующего ту или иную химическую реакцию [1–4].

Принцип действия датчиков на основе диоксида олова заключается в изменении электропроводности полупроводниковой пленки вследствие адсорбции газа на ее поверхности [3–6]. При нагреве сенсора с помощью нагревательного элемента, выполненного в конструктиве с датчиком, до рабочей температуры (~400°C) происходит адсорбция содержащегося в воздухе кислорода на его поверхность с мелкозернистой структурой [5–8]. В результате электрическая проводимость слоя диоксида олова изменяется в зависимости от концентрации газа-примеси. Отклик датчика выражается через изменение его сопротивления в зависимости от концентрации газа, изменяющего адсорбцию кислорода на материале сенсора. Быстрота отклика зависит от модели датчика и конкретного газа-примеси [1–8].

## ОПИСАНИЕ ГАЗОВОГО ДАТЧИКА

Для исследования был выбран широко распространенный датчик на основе диоксида олова – MQ 135. Схема датчика приведена на рисунке 1.

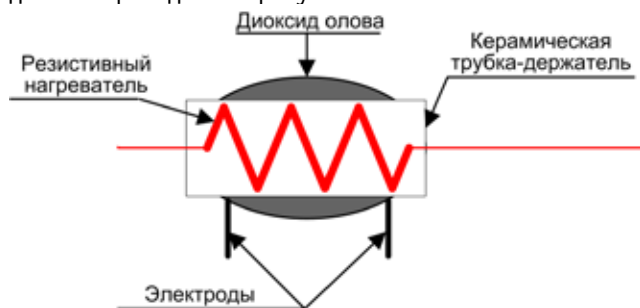


Рис. 1 Схема датчика на основе диоксида олова

Прибор реагирует на наличие в воздухе углекислого газа, окиси углерода, аммиака, паров спирта и бензина, метана и горючих газов. Газовый датчик настроен на измерение концентрации углекислого газа в диапазоне от 10 до 10000 ppm. Напряжение питания 5 В, потребляемый ток до 200 мА, в том числе 150 мА, берет подогреватель датчика. Рабочий диапазон температур от минус 10 до 50°C, влажности от 10 до 98%. Время выхода на режим после включения – до 5 минут, время реакции – до 10 с, время восстановления – до 60 с. При первом включении

время выхода на режим – до 72 часов. Зависимость отношения сопротивления сенсора на диоксиде олова от концентрации газов приведена на рисунке 2.

Зависимость сопротивления датчика от концентрации газа-примеси линейна в логарифмическом масштабе. Датчик проявляет чувствительность к различным типам газов примеси одновременно.

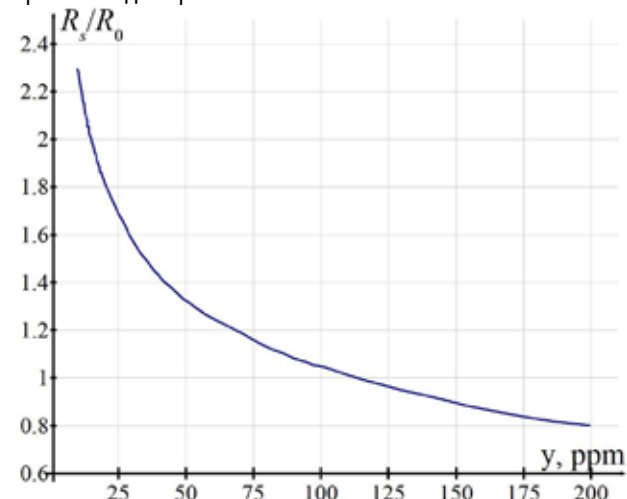


Рис. 2. Зависимости  $R_s/R_0$  от концентрации углекислого газа<sup>1</sup> при температуре 20°C и влажности 65%

Зависимости отношений сопротивлений от концентраций для углекислого газа (рис. 2) можно описать как [9, 10]:

$$y = c_0 \left( \frac{R_s}{R_0} \right)^n, \quad (1)$$

где  $y$  – концентрация углекислого газа,  $c_0 = 111,624 \text{ ppm}$  – концентрация углекислого газа при равенстве 1 отношения сопротивлений, а  $n = -2,883$ ,  $R_s$  – сопротивление датчика в данной среде к  $R_0$  – сопротивлению датчика при концентрации аммиака 100 ppm.

Чувствительность сенсора зависит от температуры и влажности окружающей среды. На рисунке 3 показаны зависимости  $R_s/R_0$  при двух различных значениях влажности.

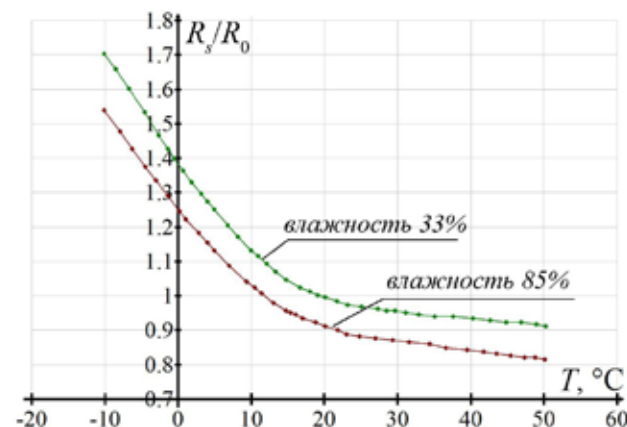


Рис. 3. Зависимость  $R_s/R_0$  от температуры<sup>1</sup>

<sup>1</sup> График зависимостей взят из руководства по эксплуатации датчика MQ 135.

Температурную зависимость  $R_s/R_0$  для влажности 33% можно описать полиномом 3 степени:

$$R_s/R_{0r}(T, 33) = -4,75 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 + 6,43 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 2,92 \cdot 10^{-2} \cdot T + 1,37, \quad (2)$$

где  $T$  – температура (°C).

А при влажности 85%:

$$R_s/R_{0r}(T, 85) = -4,51 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 + 5,75 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 2,58 \cdot 10^{-2} \cdot T + 1,24. \quad (3)$$

Если (2) и (3) разделить на их свободные члены, то получим уравнения, коэффициенты которых (при переменной в соответствующей степени) отличаются менее чем на 5%. Учитывая результаты [10], зависимость от температуры и влажности можно представить как:

$$R_s/R_{0r}(T, H) = f(T) \cdot g(H), \quad (4)$$

где  $H$  – влажность (%).

Пусть

$$g(H) = k \cdot H + H_0. \quad (5)$$

Тогда

$$R_s/R_{0r}(T, H) = (a_3 \cdot T^3 + a_2 \cdot T^2 + a_1 \cdot T + a_1) \times (k \cdot H + H_0). \quad (6)$$

Записываем систему:

$$\begin{cases} \frac{a_3}{a_0(k \cdot H_1 + H_0)} = -3,47 \cdot 10^{-6}, \\ \frac{a_2}{a_0(k \cdot H_1 + H_0)} = 4,69 \cdot 10^{-4}, \\ \frac{a_1}{a_0(k \cdot H_1 + H_0)} = -2,13 \cdot 10^{-2}, \\ a_0(k \cdot H_1 + H_0) = 1,37, \\ k = \frac{1,37 - 1,24}{1,37 \cdot H_2 - 1,24 \cdot H_1}, \\ \left( a_3 \cdot T_1^3 + a_2 \cdot T_1^2 + a_1 \cdot T_1 + a_1 \right) \times (k \cdot H_1 + H_0) = 1, \end{cases} \quad (7)$$

где  $H_1 = 33\%$ ,  $H_2 = 85\%$ ,  $T_1 = 20^\circ\text{C}$ .

Решая (7), получаем:

$$R_s/R_{0r}(T, H) = (-4,69 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 + 6,34 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 2,88 \cdot 10^{-2} \cdot T + 1,35) \cdot (-0,0018 \cdot H + 1,076). \quad (8)$$

### КАЛИБРОВКА ДАТЧИКА

Датчик поставляется без указания величины сопротивления  $R_0$ , видимо, из-за невозможности обеспечения этого параметра при изготовлении газового сенсора. Необходим метод, позволяющий производить калибровку этих датчиков и их компенсацию в зависимости от условий окружающей среды.

На рисунке 4 представлена схема измерения падения напряжения на датчике.

Пусть  $U_u = U_s$  при произвольной концентрации углекислого газа,  $U_u = U_0$  при концентрации 100 ppm аммиака, а питающее напряжение  $U = 5$  В.

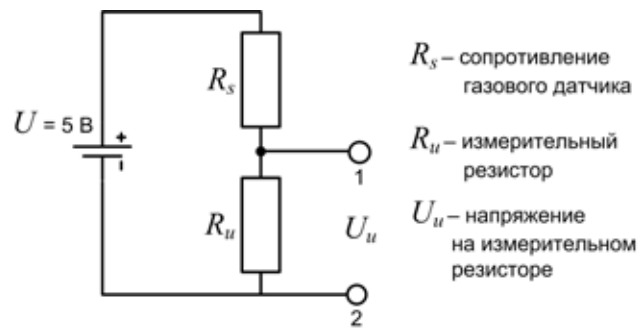


Рис. 4. Схема измерения падения напряжения на датчике

Тогда

$$\frac{R_s}{R_0}(U_s) = \frac{(U - U_s)U_0}{(U - U_0)U_s}. \quad (9)$$

И общая зависимость:

$$\frac{R_s}{R_0}(U_s, T, H) = \frac{(U - U_s)U_0}{(U - U_0)U_s} \cdot (-4,69 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 + 6,34 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 2,88 \cdot 10^{-2} \cdot T + 1,35) \cdot (-0,0018 \cdot H + 1,076). \quad (10)$$

Обозначим за  $R_{390}$  – сопротивление датчика в чистом воздухе (содержание углекислого газа  $c_{390} = 390$  ppm), а  $U_u = U_{390}$ . Из (1) находим

$$R_{390}/R_0 = (c_{390}/c_0)^{1/n} = 0,648. \quad (11)$$

Калибровка заключается в нахождении  $U_0$  из (10).

$$U_0 = \frac{R_{390} \cdot \frac{R_s}{R_0}(T_{390}, H_{390}) \cdot U \cdot U_{390}}{R_0 \cdot \frac{R_s}{R_0}(T = 20^\circ\text{C}, H = 65\%) + \left( \frac{R_{390} \cdot \frac{R_s}{R_0}(T_{390}, H_{390})}{R_0 \cdot \frac{R_s}{R_0}(T = 20^\circ\text{C}, H = 65\%)} - 1 \right) \cdot U_{390}}, \quad (12)$$

где  $R_s/R_0(T = 20^\circ\text{C}, H = 65\%)$  находится из (8).

Алгоритм калибровки представлен на рисунке 5.

### ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ

Измеряем температуру  $T_s$  и влажность  $H_s$  окружающей среды и по (8) получаем  $R_s/R_0(T_s, H_s)$ . Измеряем  $U_u = U_s$  и, используя найденное  $U_0$ , вычисляем  $R_s/R_0(U_s, T_s, H_s)$  по (9).

Алгоритм нахождения концентрации углекислого газа с учетом влияния температуры и влажности окружающей среды представлен на рисунке 6.

Для проведения температурно-влажностной компенсации необходим датчик температуры и влажности, например DHT 22. На основе этих двух датчиков (DHT 22 и MQ 135) и микроконтроллера можно построить измерительный комплекс для измерения температуры, влажности и концентрации углекислого газа в помещении.



Рис. 5. Алгоритм калибровки датчика

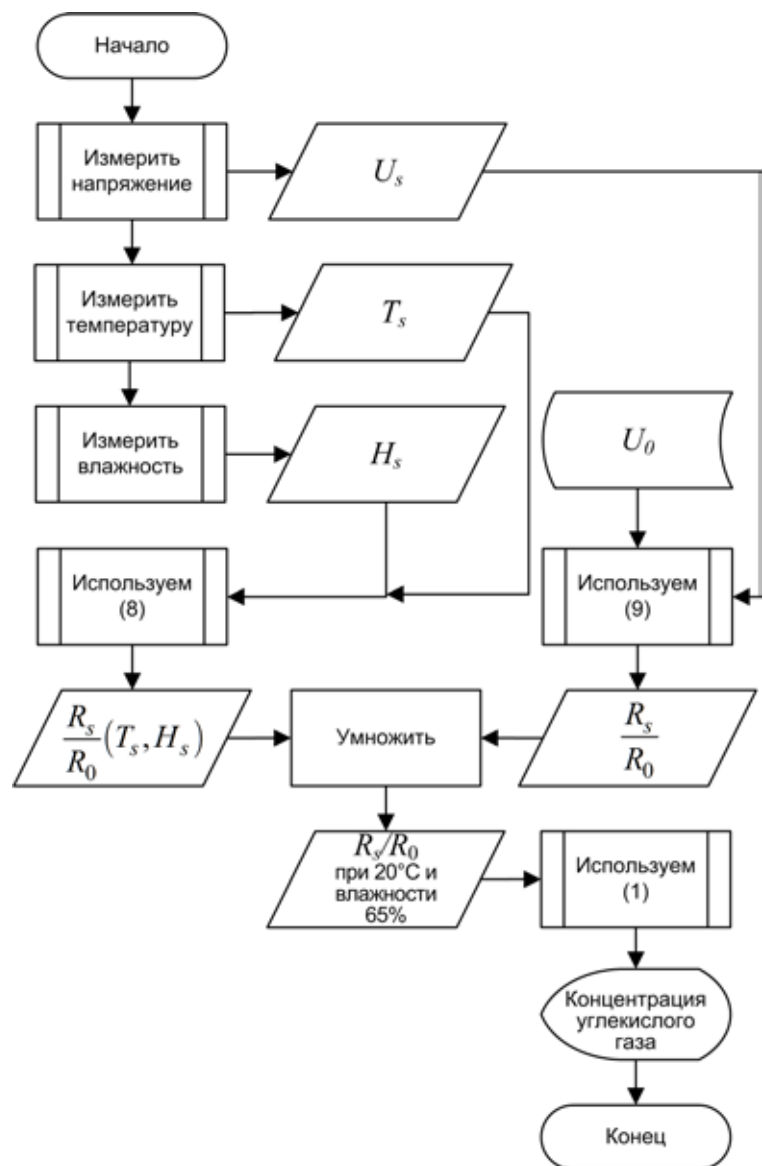


Рис. 6. Алгоритм нахождения концентрации углекислого газа с температурно-влажностной компенсацией датчика газа

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Найдены аналитические выражения зависимости от отношения сопротивления датчика от температуры и влажности окружающей среды, которая полнее описывает влияние температуры и влажности на сопротивление датчика, чем предложенная в [10]. Разработанные алгоритмы калибровки и температурно-влажностного компенсирования газового сенсора на основе диоксида олова основаны на известных подходах, могут быть применены для других датчиков из серии MQ. Используя предложенные методы и датчики серии MQ, а также результаты, полученные [9], можно построить комплексную интеллектуальную систему измерения содержания различных газов в воздухе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кинетика резистивного отклика тонких пленок SnO<sub>2</sub> в газовой среде / С.В. Рябцев [и др.] // Фи-

зика и техника полупроводников. – 2008. – № 4, Т. 42. – С. 491–495.

2. Sun Y. et al. Study of influencing factors of dynamic measurements based on SnO<sub>2</sub>gas sensor // Sensors. 2004. V. 4. № 6. pp. 95–104.

3. Barsan N., Weimar U. Understanding the fundamental principles of metal oxide based gas sensors; the example of CO sensing with SnO<sub>2</sub>sensors in the presence of humidity // Journal of Physics: Condensed Matter. 2003. V. 15. № 20. pp. 813–839.

4. Andrei P. et al. Modeling and simulation of single nanobelt SnO<sub>2</sub>gas sensors with FET structure // Sensors and Actuators B. 2007. V. 128. pp. 226–234.

5. Грачева И. Е., Мошников В. А., Осипов Ю. В. Анализ процессов на поверхности газочувствительных наноструктур методом спектроскопии полной проводимости // Известия СПбГЭТУ«ЛЭТИ». Сер. Физика твердого тела и электроника. – 2008. – № 6. – С. 19–24.

6. Электрические и газочувствительные свойства резистивного тонкопленочного сенсора на основе диоксида олова / О.В. Анисимов [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2006. – Т. 40, № 6. – С. 724–729.

7. Определение паров ацетона и этанола полупроводниковыми сенсорами / А.А. Звягин [и др.] // Журнал аналитической химии. – 2010. – Т. 65. – С. 96–100.

8. Гаман В.И. Физика полупроводниковых газовых сенсоров: монография – Томск : Изд-во НТЛ, 2012. – 112 с.

9. Синёв И. В. Температурная зависимость тонкопленочных резисторов на основе двуокиси олова : дисс. канд. физ.-мат. наук : 05.27.01. – Саратов : СГУ, 2014.

10. Семенов В. Интеллектуальный детектор газа // Современная электроника. – 2007. – № 9. – С. 16–20.

#### REFERENCES

1. Ryabtsev S.V. et al. Kinetika rezistivnogo otklika tonkikh plenok SnO<sub>2</sub> v gazovoi srede [The Kinetics of the Resistive Response of SnO<sub>2</sub> Thin Films in a Gas Environment]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Semiconductor Physics and Engineering], 2008, no. 4, vol. 42, pp. 491–495.

2. Sun Y. et al. Study of Influencing Factors of Dynamic Measurements Based on SnO<sub>2</sub> -Gas Sensor. *Sensors*, 2004, vol. 4, no. 6, pp. 95–104.

3. Barsan N., Weimar U. Understanding the Fundamental Principles of Metal Oxide Based Gas Sensors; the Example of CO Sensing with SnO<sub>2</sub>-Sensors in the Presence of Humidity. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2003, vol. 15, no. 20, pp. 813–839.

4. Andrei P. et al. Modeling and Simulation of Single Nanobelt SnO<sub>2</sub>-Gas Sensors with FET Structure. *Sensors and Actuators B*, 2007, vol. 128, pp. 226–234.

5. Grachev I.E., Moshnikov V.A., Osipov Y.V. Analiz protsessov na poverkhnosti gazochuvstvitelnykh nanostruktur metodom spektroskopii polnoi provodimosti [Analysis of Processes on Gas Sensitive Nanostructures Surface by Full Conductivity Spectroscopy Method]. *Izvestiya SpbGETU 'LETI'. Ser. Fizika tverdogo tela i elektronika* [Proc. of ETU 'LETI'. Solid State Physics and Electronics Series]. 2008, no. 6, pp. 19–24.

6. Anisimov O.V. et al. Elektricheskie i gazochuvstvitelnye svoystva rezistivnogo tonkopenochnogo sensora na osnove dioksida olova [Electrical and Gas Sensitive Properties of Tin Dioxide Thin Film Gas Sensor]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Semiconductor Physics and Engineering], 2006, vol. 40, no. 6, pp. 724–729.

7. Zviagin A.A. et al. Opredelenie parov atsetona i etanola poluprovodnikovymi sensorami [Determination of Acetone and Ethanol Vapors Using Semiconductor Sensors]. *Zhurnal analiticheskoi khimii* [Journal of Analytical Chemistry], 2010, vol. 65, pp. 96–100.

8. Gaman. V.I. *Fizika poluprovodnikovykh gazovykh sensorov*. Monografiia [Physics of Semiconductor Gas Sensors. Monography]. Tomsk, NTL Publ., 2012. 112 p.

9. Sinev I.V. *Temperaturnaia zavisimost tonkopenochnykh rezistorov na osnove dvoukisi olova*. Diss. kand. fiz.-mat. nauk [Temperature Dependence of Thin Film Resistors Based on Tin Dioxide. Cand. Phys. and Math. Sci. Diss.]. Saratov, Saratov State University Publ., 2014.

10. Semenov V. *Intellektualnyi detektor gaza* [Intelligent Gas Detector]. *Sovremennaia elektronika* [Modern Electronics], 2007, no. 9, pp. 16–20.