

Метод обработки данных откликов резистивных сенсоров газа для сокращения времени определения концентрации

С. Новиков¹, Н. Плуготаренко, к. т. н.²

УДК 621.35.035 | ВАК 05.11.01

В настоящее время актуальна задача быстрого и точного определения концентрации газов, что может существенно улучшить технологические процессы и обеспечить безопасность. Стоит отметить, что по сравнению с обычным однопараметрическим анализом данных детальная информация, полученная в результате более глубокого анализа результатов, потенциально может значительно повысить точность и скорость измерений. В статье рассматривается метод обработки данных откликов резистивных сенсоров, который позволяет сократить время определения концентрации газа, а также увеличить точность получаемых результатов по сравнению со стандартными методиками проведения измерений.

Полупроводниковые сенсоры используются в качестве датчиков молекул различных газов [1]. Они обладают большим количеством положительных свойств: чувствительность, быстроедействие, миниатюрность, низкая стоимость. Одна из задач, стоящих в настоящее время при разработке и эксплуатации сенсоров, – повышение чувствительности и скорости детектирования применительно к задачам газового анализа [2, 3].

При проведении измерений малых концентраций газов существует проблема погрешности, возникающей из-за того, что реакция резистивного сенсора по амплитуде может быть сопоставима с возникающим шумом.

Обнаружение различных опасных газов, а также паров продолжает оставаться актуальным. В том числе паров этанола, который является важнейшим индикатором и процедурным звеном освидетельствования состояния опьянения, а также загрязнителем окружающей среды на производствах. Необходимость контроля концентрации – одна из важных задач техники безопасности и экологического мониторинга [3, 4, 5].

В работе [6] используется преобразование Гильберта – Хуанга для динамического анализа характеристик

сигналов газовых датчиков. Для ускорения распознавания газа применяется метод начального наклона и метод фиксированной временной точки [7].

В ряде методов повышение чувствительности химических сенсоров достигается за счет изменения температуры [8] и модификации газа перед датчиками [9].

Другой, более простой, подход заключается в использовании информации из переходной части кривой отклика, когда состав газа изменяется ступенчато. Таким образом, используя больше параметров, чем просто стандартный отклик, характеризующий измерение, можно улучшить чувствительность сенсора [10].

Также используются оценки отклика датчика на основе производной по времени первого порядка для анализа его стабильности во времени [8].

Анализ данных отклика сенсора позволяет решить проблему дрейфа сигнала, который возникает из-за длительной работы или внешнего воздействия [11], и может быть использован для уменьшения погрешности измерения и повышения стабильности и селективности сенсора [12–14].

Проблема шума сигнала должна быть решена при обработке сигнала датчика с помощью методов фильтрации [14, 15]. Изменения температуры и расхода газа во время измерений также влияют на определение концентрации газа, и их следует учитывать при обработке сигнала [16].

Стандартная методика предполагает, что измерение может быть закончено при достижении номинального времени установления показаний (выходного

¹ Южный федеральный университет, институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, кафедра техносферной безопасности и химии, аспирант, n_serg7@mail.ru.

² Южный федеральный университет, институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, кафедра техносферной безопасности и химии, заведующий кафедрой, plugotarenko@mail.ru.

сигнала) $0,9\tau_{\text{ном}}$, согласно ГОСТ 13320-81. При этом полное время насыщения $\tau_{\text{ном}}$, при котором молекулы газа не смогут осаждаться на сенсоре, может быть достаточно продолжительным.

Ранее в работе [10] было показано, что для построения калибровочных зависимостей можно использовать не только полное значение сопротивления, но также и другие параметры, такие как первая ($S'(t)$) и вторая ($S''(t)$) производные сигнала, коэффициент наклона аппроксимирующей прямой из уравнения Еловича, начальная скорость изменения сигнала (S'_0). Такие данные могут быть получены по динамическим показателям отклика.

Цель данной работы – представить разработанный метод и алгоритм анализа данных, которые позволяют на основе нескольких полученных калибровочных зависимостей увеличить точность и сократить время определения концентрации газа.

Описание метода. Исходный сигнал – последовательность данных о зависимости сопротивления от времени – поступает от сенсора. Данные, полученные в ходе измерений, состоят из суммы полезного сигнала, случайного шума и ошибок, полученных в ходе измерений. Также в сигнале присутствуют шумы, которые возникают в электронных системах записи, когда происходит изменение условий окружающей среды и др. Для повышения воспроизводимости результатов анализа системой обработки выполняется предварительное сглаживание исходных данных.

На рис. 1 приведена схема метода обработки, которая выполняется программно, через модуль взаимодействия, управляющий алгоритмом обработки, а также записью на носитель. Данные, поступающие с сенсора, накапливаются в буфере в течение определенного

времени t (интервал скользящего окна), которое можно задать в настройках программы (предлагается принять $t=5$ с). В блоках 1, 2, 3 происходит следующая обработка сигнала:

1. Очистка сигнала от шума одним из методов фильтрации.
2. Расчет первой производной (скорости изменения сигнала) в скользящем окне, определение ее экстремума.
3. Расчет второй производной (ускорения изменения сигнала) в скользящем окне, определение ее экстремума.
4. Сохранение данных в буфере обработки для дальнейшего анализа.
5. Сравнение экстремума первой производной сигнала со значением, рассчитанным на предыдущем шаге; если экстремум превышает предыдущее значение, то скользящее окно перемещается на промежуток времени t , проводится повторная обработка сигнала по пунктам 1–4.
6. Иначе, данное значение сохраняется как экстремум первой производной.
7. Сравнение экстремума второй производной со значением, рассчитанным на предыдущем шаге; если экстремум не превышает предыдущее значение, то скользящее окно перемещается на промежуток времени t , проводится повторная обработка сигнала по пунктам 1–4.
8. Иначе, данное значение сохраняется как экстремум второй производной.
9. В данном случае можно не ожидать дальнейшую реакцию сенсора, а по экстремумам определить концентрацию газа.

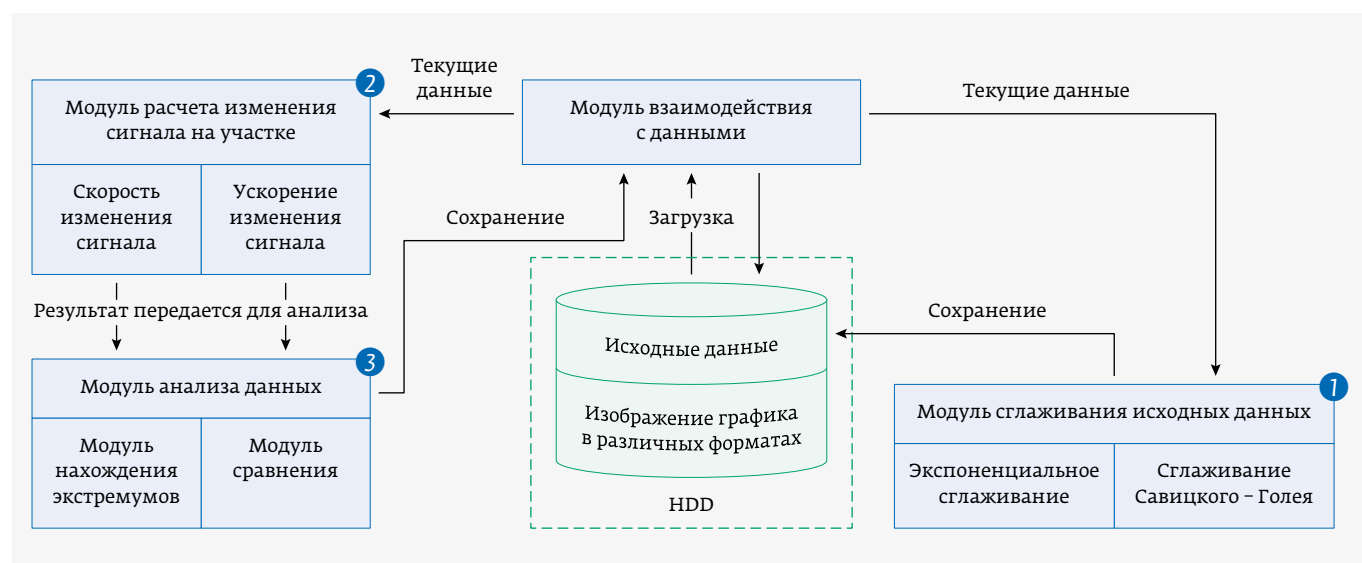


Рис. 1. Схема метода обработки сигнала

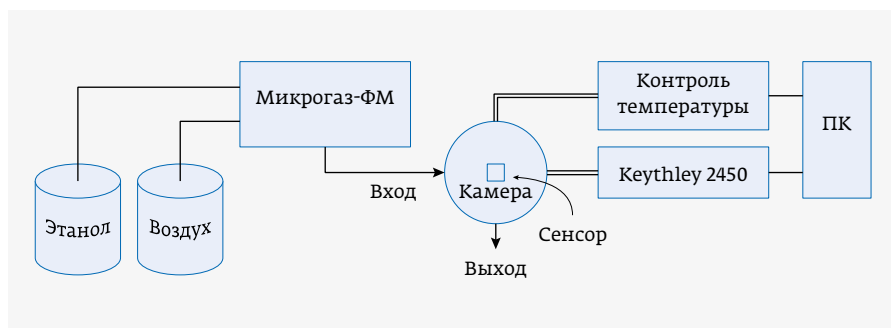


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

В результате работы метода принимается решение об окончании измерения и выдача результата.

Для апробирования представленного метода в качестве экспериментальных образцов взяты сенсорные элементы на основе кремний-углеродных пленок, легированных медью, полученные методом электрохимического осаждения [16, 17].

Газовый датчик был помещен в испытательную камеру, оборудованную нагревательным элементом, исследуемый газ и разбавитель подключаются к устройству для получения газовой смеси Микрогаз-ФМ, позволяющему точно задавать концентрацию газа (рис. 2).

Цилиндрическая камера из фторполимера объемом 8 см³ имеет вход и выход газа. В нижней части камеры расположена пластина с нагревательным элементом для установки образца.

Газовый датчик нагревается от источника постоянного тока с точностью поддержания требуемой температуры

± 1 °С. Измерения проводились при подаче в испытательную камеру смеси синтетического воздуха и паров этанола (в соответствии с требованиями к рабочим эталонам 2-го разряда согласно ГОСТ Р 8.676-2009). Сигнал от датчика принимался источником-измерителем Keithley 2450, подключенным к компьютеру.

Для получения набора откликов проведена серия экспериментов с различными концентрациями газа С (ppm). В качестве рабочей температуры выбрана температура 100 °С. При таких параметрах наблюдается хорошая реакция сенсора при небольшом уровне шума (рис. 3, 4).

В результате применения разработанного метода и алгоритма обработки построено четыре калибровочные зависимости. Получая данные при измерении нескольких концентраций газа, можно построить калибровочные зависимости исходя из выбора значений экстремумов первой и второй производной, а также коэффициента наклона аппроксимирующей линии из уравнения Еловича (рис. 5–8).

Выбор лучшей калибровочной зависимости происходит по коэффициенту детерминации R^2 . В случае приведенного примера с сенсором этанола это зависимости, построенные по экстремумам первой и второй производных.

При эксплуатации сенсора, применяя разработанный метод, можно определять перечень динамических

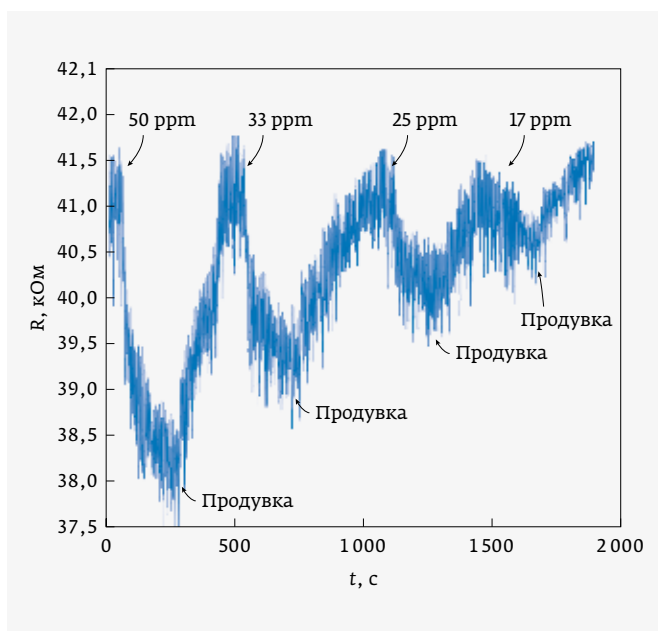


Рис. 3. Исходный сигнал с шумом

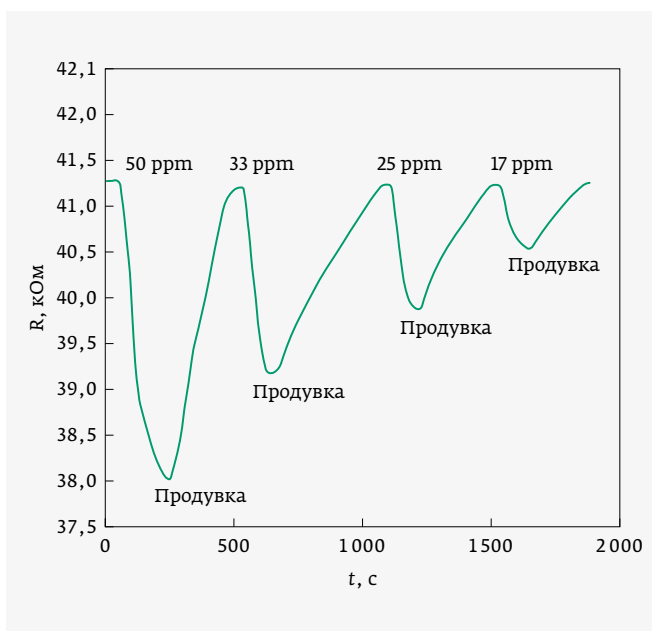


Рис. 4. Исходный сигнал после фильтрации

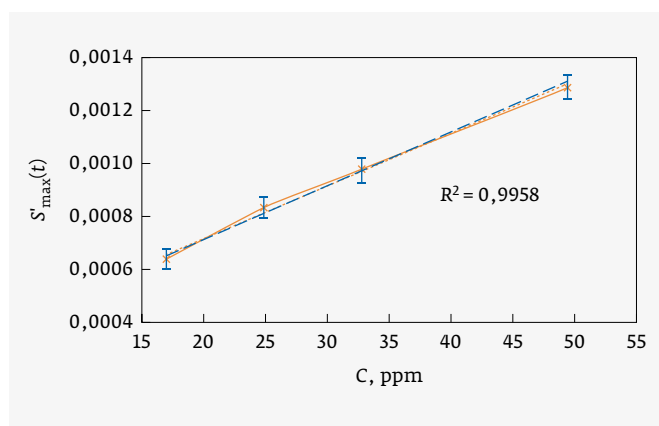


Рис. 5. Калибровочная зависимость на основе экстремумов первой производной

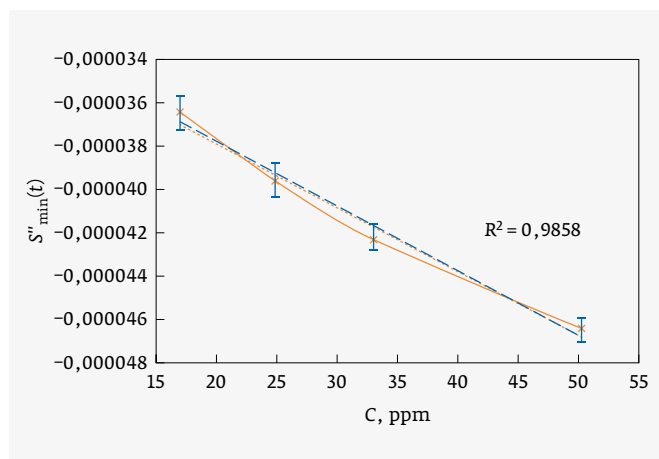


Рис. 6. Калибровочная зависимость на основе экстремумов второй производной

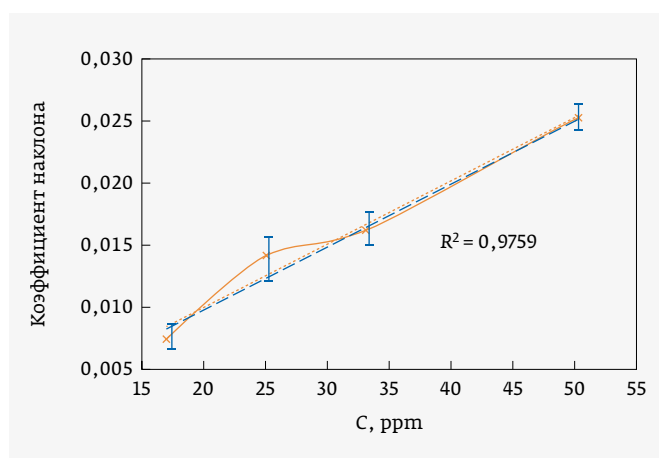


Рис. 7. Калибровочная зависимость на основе коэффициента наклона аппроксимирующей линии из уравнения Еловича

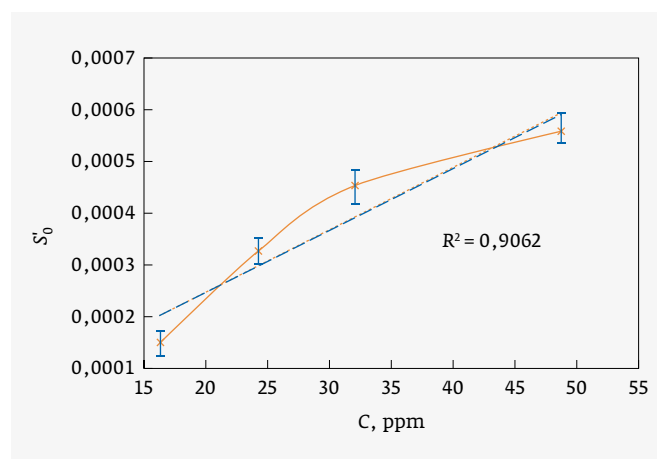


Рис. 8. Калибровочная зависимость на основе начальной скорости изменения сигнала

параметров отклика и по их значениям быстрее и точнее определять концентрацию газа. В случае с выбранным сенсором время определения концентрации сокращается в среднем в пять раз, точность повышается на 10% по сравнению со стандартной методикой проведения измерений.

ООО "Руднев-Шиляев"

- разработка измерительных систем по техническому заданию Заказчика.
- помощь в составлении технического задания Заказчика.
- производство измерительных систем.
- разработка и производство приборов.
- разработка программно-аппаратного обеспечения по ТЗ Заказчика.
- сертификация измерительных систем и приборов.

**Инструментальные решения
задач заказчика!**

125130, г. Москва, ул. Клары Цеткин, д. 33 корп. 35
www.rudshel.ru, e-mail: adc@rudshel.ru
тел./факс: (495) 787-6367, 787-6368

В заключение отметим, что предлагаемый метод обработки сигналов сенсоров и построение калибровочных кривых позволяют не дожидаться полного времени насыщения при подаче газа для оценки концентрации и сократить время детектирования. В дальнейшем оценка нескольких параметров динамики отклика датчика может быть использована не только для определения концентрации, но и для распознавания самого газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Lundstrom I., Spetz A., Winqvist F., Ackelid U., Sundgren H.** Catalytic metals and field-effect devices – a useful combination // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 1990. V. 1, № 1–6, PP. 15–20.
2. **Sauter D., Weimar U., Noetzel G., Mitrovics J., Göpel W.** Development of Modular Ozone Sensor System for application in practical use // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2000. V. 69, № 1–2, PP. 1–9.
3. **Обвинцева Л. А., Губанова Д. П.** Быстрая идентификация хлора и диоксида хлора в воздухе полупроводниковыми сенсорами // *Журнал аналитической химии*. 2004. Т. 59, № 8. С. 876–878.
4. **Муродова З. Б., Яхшиликowa Л. Ж., Абдурахманов Э.** Разработка полупроводникового сенсора для определения паров этилового спирта // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2015. № 4–1. С. 51–55.
5. **Звягин А. А., Шапошник А. В., Рябцев С. В.** Определение паров ацетона и этанола полупроводниковыми сенсорами // *Журнал аналитической химии*. 2010. Т. 65, № 1. С. 96–100.
6. **Wen A., Chun-Ying Y. and Guang-Fen W.** Dynamic signal processing for gas sensors based on Hilbert-Huang Transform // *Proc. of the 3rd IEEE Int. Conf. on computer Science and Information Technology*. 2010. PP. 241–245.
7. **Field C. R., Hyun Jin In, Begue N. J., Pehrsson P. E.** Vapor detection performance of vertically aligned, ordered arrays of silicon nanowires with a porous electrode // *Anal. Chem.* 2011. V. 83, № 12, PP. 4724–4728.
8. **Magna G., Di Natale C., Martinelli E.** Self-Repairing classification algorithms for chemical sensor array // *Sensors & Actuators B: Chemical*. 2019. V. 297. 126721.
9. **Plugotarenko N. K., Myasoedova T. N., Novikov S. P. and Mikhailova T. S.** Comparative Analysis of Derivative Parameters of Chemoresistive Sensor Signals for Gas Concentration Estimation // *Chemosensors*. 2022. 10(4). 126.
10. **Rodner M., Eriksson J.** First-order time-derivative readout of epitaxial graphene-based gas sensors for fast analyte determination // *Sensors and Actuators Reports*. 2020. V. 2, № 1. 100012.
11. **Sorocki J., Rydosz A.** A prototype of a portable gas analyzer for exhaled acetone detection // *Appl. Sci.* 2019. 9(13). 2605.
12. **Isaienko O., Maksymovych N., Yatsimirsky V.** Determination of the sensitive layer temperature of the adsorption semiconductor gas sensor // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2005. V. 108, № 1–2, PP. 134–142.
13. **Satterthwaite P. F., Eberle S., Nedelcu S., Roman C., Hierold C.** Transient and steady-state readout of nanowire gas sensors in the presence of low-frequency noise // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2019. V. 297. 126674.
14. **Gomri S., Seguin J.-L., Guerin J., Aguir K.** A mobility and free carriers density fluctuations based model of adsorption-desorption noise in gas sensor // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2008. V. 41, № 6. 065501.
15. **Obvintseva L. A., Sharova T. B., Avetisov A. K., Sukhareva I. P.** Semiconductor sensors for studying the heterogeneous destruction of ozone at low concentrations // *Russ. J. of Phys. Chem. A*. 2018. V. 92, № 6, PP. 1099–1106.
16. **Myasoedova T. N., Plugotarenko N. K., Moiseeva T. A.** Copper-containing films obtained by the simple citrate sol-gel route for NO₂ detection: Adsorption and kinetic study // *Chemosensors*. 2020. 8. 79.
17. **Myasoedova T. N., Mikhailova T. S., Plugotarenko N. K.** A study on a NO₂ sensor based on SiO₂-ZrO₂ composite film. In *Proceedings of the 2018 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, 2–6 October 2018.

ООО "КЕКО Р"

Производство и поставка технологических материалов для электронных компонентов на основе керамики: LTCC система SK-47 (керамика, пасты), HTCC система (керамика, пасты).
Керамические и АМВ подложки на основе нитрида алюминия и нитрида кремния,
а также технологии и оборудование для производства LTCC/HTCC/MLCC/MLCI/PZT/SOFC.

WWW.KEKO-R.RU

+7 (499) 398 0770

INFO@KEKO-R.RU



Testing&Control

25–27 октября 2022
Москва, Крокус Экспо

19-я Международная выставка
испытательного и контрольно-
измерительного оборудования



testing-control.ru



Измерительное
и метрологическое
оборудование



Оборудование
для лабораторного
контроля



Испытательное
оборудование



Оборудование
для неразрушающего
контроля и технической
диагностики



Производственный
контроль и машинное
зрение



Системы диагностики
и мониторинга

Забронируйте стенд
testing-control.ru



Организатор



Международная
Выставочная
Компания

+7 (495) 252 11 07
control@mvk.ru