

И. И. Билинский, д. т. н., проф.; Б. П. Кныш; А. А. Павлюк

ИНФРАКРАСНЫЙ ДВУХВОЛНОВОЙ ДАТЧИК КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ГАЗА

В статье рассмотрена математическая модель датчика концентрации газа. Приведена его оптическая схема, принцип работы и результаты моделирования.

Ключевые слова: инфракрасный двухволновой датчик, концентрация, контроль, кювета, излучение, газ, примеси.

Введение

На сегодняшний день во многих областях техники используются разнообразные методы исследования физических параметров газа. Они позволяют определить плотность и концентрацию, содержание вредных примесей, количественный состав газа. Одним из параметров газа является его концентрация. Так, газоанализаторы украинских предприятий – ТОО «Экотест» (г. Харьков), ОАТ «Аналитприбор» (г. Киев), НПП «Орион» (г. Харьков), «Антекс» (г. Северодонецк) – предназначены преимущественно для работы на предприятиях, поскольку не обеспечивают должный уровень чувствительности и точности измерений. Например, газоанализатор ОКСИ позволяет контролировать концентрацию оксида азота в пределах долей миллиграмма на 1 м³ воздуха при ГДК_{NO} = 40 мкг/м³ для жилых помещений. К тому же, относительная погрешность измерений некоторых газоанализаторов достигает 25 % [1 – 3].

Во многих случаях главным недостатком датчиков концентрации газа, такого как: азот, метан, этан и др., является низкая точность измерительного контроля, поскольку отсутствует возможность компенсации дестабилизирующих факторов и показателей, которые характеризуют адиабатический процесс. В связи с этим возникает задача повышения точности измерительного контроля датчиков путем учета адиабатического процесса.

Основная часть

В основе работы датчика лежит метод абсорбционной спектрометрии, который основывается на поглощении частицами газа светового излучения и регистрации части поглощенного излучения. При этом каждый газ имеет свой уникальный спектр поглощения и максимум этого поглощения приходится на соответствующие длины волн для разных газов. Используя излучения конкретной длины волны, можно определить концентрацию соответствующего компонента с высокой точностью, так как применяется явление избирательного поглощения многоатомными молекулами излучения при его прохождении сквозь среду. Избирательное поглощение объясняется тем, что оно происходит на тех волнах, частота которых является резонансной для соответствующих молекул [4].

Если через анализируемый газ проходит пучок излучения с интенсивностью $I_0(\nu)$, то часть излучения поглощается. В общем случае поглощение происходит по закону Бугера – Ламберта – Бера [5]

$$I(\nu) = I_0(\nu)e^{-K(\nu)Cd}, \quad (1)$$

где $K(\nu)$ – показатель поглощения, который является функцией частоты ν и зависит от природы вещества; C – молярная концентрация контролируемого газа; d – толщина слоя газа.

Плотность газовой смеси $\rho_{Г.С.}$ в общем случае определяется как сумма плотности чистого, т. е. известного, газа $\rho_{Г.}$ и примесей в нем $\rho_{П.}$ при их парциальных давлении и температуре

$$\rho_{Г.С.} = \rho_{Г.} + \rho_{П.}.$$

Поскольку поглощение излучения происходит как за счет влияния чистого, т. е. известного, газа, так и за счет примесей в нем, только в разной степени, то модель перенесения излучения в такой среде может быть представлена как в [4]. Учитывая при этом, что молярная концентрация вещества пропорциональна его плотности $C = \rho/\mu$, закон Бугера – Ламберта – Бера принимает вид

$$I_{Г.С.}(\nu) = I_0(\nu) e^{-d \left(K^{Г.}(\nu) \frac{\rho_{Г.}}{\mu_{Г.}} + K^{П.}(\nu) \frac{\rho_{П.}}{\mu_{П.}} \right)}, \quad (2)$$

где $K^{П.}(\nu)$ и $K^{Г.}(\nu)$ – молярные удельные показатели поглощения примесей и известного газа на частоте ν соответственно; $\mu_{П.}$ и $\mu_{Г.}$ – молярные массы примесей и известного газа соответственно.

Так как концентрация примесей газа определяется из соотношения $c = \frac{\rho_{П.}}{\rho_{Г.} + \rho_{П.}}$, то

плотность примесей при рабочих условиях определяется как $\rho_{П.} = \frac{c \rho_{Г.}}{1 - c}$.

При условиях давления газа, близкого к 10^5 Па, и малых плотностях, свойства его близки к свойствам идеального их можно описать уравнением Клапейрона – Менделеева

$$pV = \frac{mRT}{\mu},$$

где p , V , m , μ , T – давление, объем, масса, молярная масса и температура газа соответственно; R – универсальная газовая постоянная.

Плотность газа при рабочих условиях определяют, когда $P = P_{(c)}$ и $T = T_{(c)}$ согласно отношению

$$\rho_{Г.} = \frac{P \cdot \rho_{(c)} \cdot T_{(c)}}{T \cdot P_{(c)}}, \quad (3)$$

где $\rho_{(c)}$ – плотность чистого газа в идеальном газовом состоянии.

Тогда плотность примесей при рабочих условиях переписывают таким образом

$$\rho_{П.} = \frac{c \cdot P \cdot \rho_{(c)} \cdot T_{(c)}}{(1 - c) T \cdot P_{(c)}}. \quad (4)$$

Используя выражения (3) и (4), закон Бугера – Ламберта – Бера для газа при рабочих условиях перепишем в виде

$$I_{Г.С.}(\nu_1) = I_0(\nu_1) e^{-d \left(K^{Г.}(\nu_1) \frac{P \cdot \rho_{(c)} \cdot T_{(c)}}{\mu_{Г.} \cdot T \cdot P_{(c)}} + K^{П.}(\nu_2) \frac{c \cdot P \cdot \rho_{(c)} \cdot T_{(c)}}{\mu_{П.} (1 - c) T \cdot P_{(c)}} \right)}. \quad (5)$$

Недостаток такой модели – наличие молярной массы газа, поскольку она в данном случае является величиной переменной и зависит от состава газа. Для устранения этого недостатка в работе предлагается двухволновая модель, которая позволяет пренебречь молярной массой

газа и компенсировать показатели адиабаты. При этом световые волны настроены таким образом, что первая имеет наиболее выраженные поглощающие свойства по отношению к примесям газа, а вторая – наименее выраженные поглощающие свойства по отношению к этим примесям.

Закон Бугера – Ламберта – Бера для другой длины волны как для известного газа можно записать

$$I_{Г.С.}(v_2) = I_0(v_2) e^{-dK^Г(v_2) \frac{P \cdot P(c) \cdot T(c)}{\mu_{Г.} \cdot T \cdot P(c)}} \quad (6)$$

На основе системы уравнений (5) и (6) получим концентрацию примесей газа

$$c = \frac{\ln \frac{I_{Г.С.}(v_1)}{I_0(v_1)} - \frac{K^Г(v_1)}{K^Г(v_2)} \cdot \ln \frac{I_{Г.}(v_2)}{I_0(v_2)}}{\ln \frac{I_{Г.С.}(v_1)}{I_0(v_1)} - \frac{K^Г(v_1)}{K^Г(v_2)} \cdot \ln \frac{I_{Г.}(v_2)}{I_0(v_2)} - K^П(v_1) \cdot \frac{d \cdot T(c) \cdot P(c)}{\mu_{П.} \cdot T \cdot P(c)}} \quad (7)$$

График зависимости концентрации примесей газа (7) от интенсивности света при значении рабочих условий, соответствующих стандартным, выполнен в среде Mathcad и изображен на рис. 1. Коэффициенты поглощения газа $K^П(v)$ и $K^Г(v)$ взяты из [4]. Из графика следует, что зависимость концентрации примесей газа от интенсивности имеет экспоненциальный характер. При этом влияние известного газа имеет место, хотя оно и незначительное.

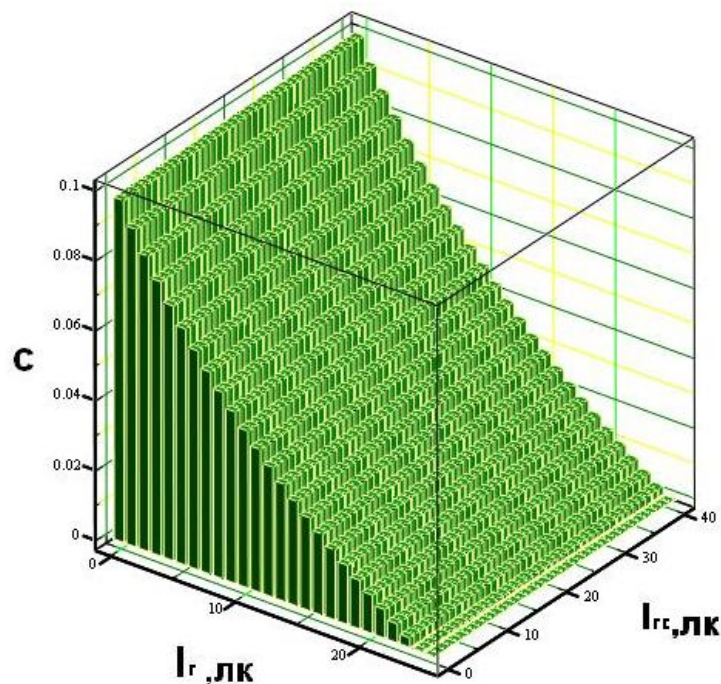


Рис. 1. График зависимости концентрации примесей газа от интенсивности излучения

На рис. 2 приведена схема оптического двухволнового датчика концентрации газа, который состоит из двух кювет – рабочей 1, в которой содержится газовая смесь, и опорной 2, в которой содержится известный газ.

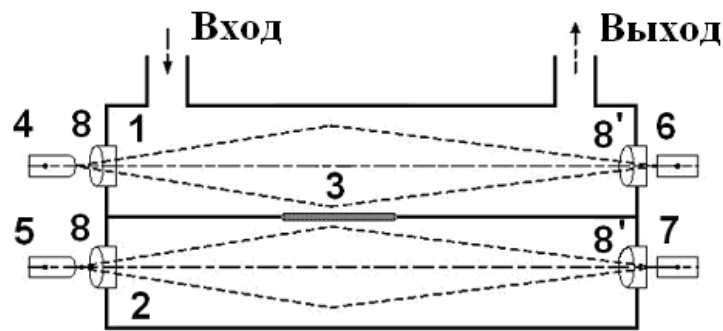


Рис. 2. Схема оптического датчика концентрации газа:

1 – рабочая кювета; 2 – кювета с опорным газом; 3 – диафрагма; 4, 5 – источники излучения измеряемого и опорного каналов соответственно; 6, 7 – выходы приемников излучения измеряемого и опорного каналов соответственно; 8 и 8' – оптические системы

Анализируемый газ прокачивается через входной патрубок рабочей кюветы 1. Источники инфракрасного излучения измеряемого 4 и опорного 5 каналов формируют световые потоки, которые проходят сначала через входные оптические системы 8 для рассеивания световых потоков, а потом через анализируемый газ, который давит на диафрагму 3 кюветы с опорным газом 2, в рабочей кювете 1 и опорный газ кюветы 2 соответственно, и попадают на выходные оптические системы 8' для сбора световых потоков, а потом на приемники инфракрасного излучения измерительного канала 6 и опорного канала 7 [6, 7].

Для подтверждения работы датчика проведено моделирование его схемы при помощи пакета сквозного схемотехнического проектирования OrCAD [8, 9], которое приводится на рис. 3.

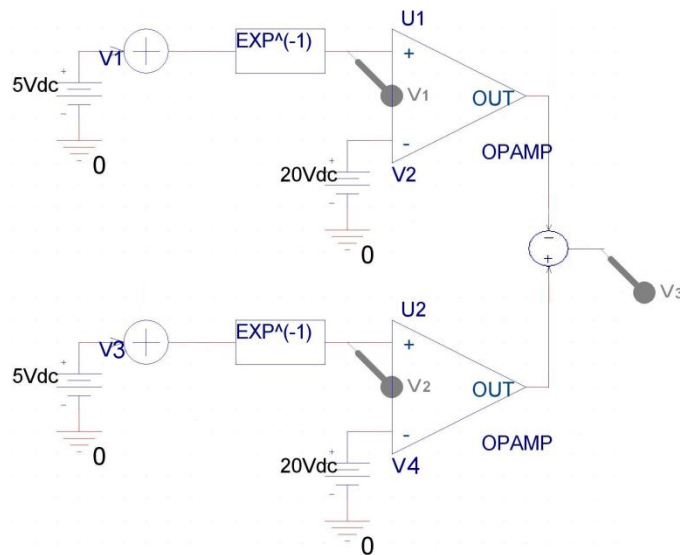


Рис. 3. Смоделированная схема датчика

Схема моделирования датчика представлена в виде двух каналов, сигналы на выходе которых сравниваются.

Результаты моделирования приведены на рис. 4.

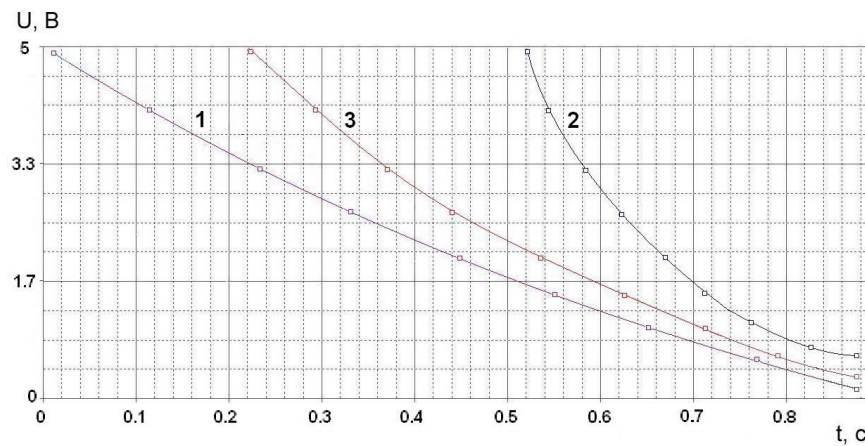


Рис. 4. Выходные характеристики датчиков: 1 – после экспоненциатора первого канала; 2 – после экспоненциатора второго канала; 3 – на выходе схемы

Как видно из графика, все зависимости имеют экспоненциальный характер, что соответствует теоретическим исследованиям. Выходная характеристика, которая представляет собой разницу сигналов первого и второго каналов, также является экспоненциальной, но более линейной.

Таким образом экспериментально подтверждены результаты математического аппарата, который описывает зависимость концентрации примесей газа от интенсивности света, проходящего сквозь газовую смесь. Все они имеют экспоненциальный характер.

Выводы

Предложен инфракрасный двухволновой датчик концентрации газа со специальной диафрагмой, которая позволяет повысить точность измерений вследствие компенсации действия показателей адиабаты и дестабилизирующих факторов. При помощи моделирования экспериментально подтверждена экспоненциальная зависимость концентрации примесей газа от интенсивности света, проходящего сквозь газовую смесь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Офіційна web-сторінка ТОВ «Екотест» [Електронний ресурс] : Ukrainian Context Optimizer. – Режим доступу : <http://www.ecotest.kharkov.ua>.
2. Офіційна web-сторінка НПП «Оріон» [електронний ресурс] : Ukrainian Context Optimizer. – Режим доступу : <http://www.orion.com.ua>.
3. Книш Б. П. Універсальна класифікація оптичних методів дослідження густини газу / Б. П. Книш, Й. Й. Білинський, В. В. Онушко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2010. – № 4. – С. 23 – 26.
4. Білинський Й. Й. Модель перенесення випромінювання в середовищі вологого газу та визначення його відносної вологості / Й. Й. Білинський, В. В. Онушко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 5. – С. 18 – 22.
5. Бугера-Ламберта-Бера закон [Електронний ресурс] : Ukrainian Context Optimizer. – Режим доступу: http://www.femto.com.ua/articles/part_1/0388.html.
6. Пат. 2134874 Российская Федерация, МПК⁶ G01N 21/61. Устройство для измерения концентрации газа / Белогулов Д. А.; Хиврин М. В.; Пошихонов А. С.; заявник та патентовласник Государственный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по автоматизации угольной промышленности «Гипроуглеавтоматизация» – № 96123856/25; заявл. 19.12.96; опубл. 20.08.99.
7. Пат. 89707 Україна, МПК⁹ H01L 33/00, H01L 27/15, G01N 21/01. Оптичний сенсор газів / заявник та патентовласник Кабацій В. М.; Блецкан Д. І.; Гасинець В. О. – № a200807108; заявл. 22.05.08; опубл. 25.02.10, Бюл. № 4.
8. Бадулин С. С. Автоматизированное проектирование цифровых устройств / С. С. Бадулин. – М.: Радио и связь, 1991. – 325 с.

9. Предко М. Д. Справочник по РСІ-микроконтроллерам / М. Д. Предко. – М.: ДМК Пресс, 2002. – 512 с.

Билинский Иосиф Иосифович – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой электроники.

Кныш Богдан Петрович – студент кафедры электроники.

Павлюк Александр Анатольевич – студент кафедры электроники.
Винницкий национальный технический университет.