

УДК 658.56:681.325.5

ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО АБСОРБЦИОННОГО ИНФРАКРАСНОГО ГАЗОАНАЛИЗАТОРА СРЕДСТВАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Вовна А.В., магистрант, Хламов М.Г., доцент, к.т.н.

*(Донецкий национальный технический университет,
г.Донецк, Украина)*

E-mail: Vovna_Alex@ukr.net

Окружающая среда Донецкой области в критическом состоянии. Экологические проблемы накапливались здесь десятилетиями, а происходящие негативные изменения приобретают негативный характер. Одним из самых мощных источников загрязнения выступает автомобильный транспорт. Вопросам контроля этих выбросов посвящена настоящая работа.

Разработана математическая модель бездисперсионного измерителя объемной концентрации сажи, оксида и диоксида углерода в выхлопных газах двигателя внутреннего сгорания. Данная модель представлена с учетом динамики изменений исследуемой концентрации с использованием системного подхода, путем применения спектроскопического оптико-абсорбционного метода определения концентраций исследуемой газовой смеси. Этот метод основан, на способности атмосферных газов избирательно поглощать инфракрасное излучение в спектральной области, и относится к бездисперсионным методам абсорбционной спектроскопии. В соответствии с экспериментальными данными о молекулярном поглощении [1] спектр поглощения оксида и диоксида углерода имеет сложную структуру. Спектр поглощения исследуемых газов, полученный при высокой разрешающей способности анализатора, включает в себя спектральные полосы, каждая из которых содержит электронно–колебательно–вращательные компоненты и их комбинационные составляющие, отличающиеся местом положения в спектральной области и интенсивностью поглощения. Наиболее интенсивная колебательно–вращательная полоса поглощения лежит в области с центром $\lambda=4,66$ мкм для оксида углерода и $\lambda=4,39$ мкм для диоксида углерода. Спектр

структуры носит характер длинно- и коротковолновых не полностью симметричных крыльев при центральной вращательной составляющей колебательно-вращательные полосы поглощения, представляющие собой последовательности линий поглощения, контур каждой из которых определяется межмолекулярными соударениями и описывается коэффициентом поглощения $K(\lambda)$ полосы, который выражается суммой коэффициентов поглощения отдельных линий:

$$K(\lambda) = \sum_{i=1}^{\infty} K_i(\lambda) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{a_i}{\delta} \cdot \frac{\ddot{a}_i}{(\lambda - \lambda_{0i})^2 + \ddot{a}_i^2} \quad (1)$$

где $a_i = \int_0^{\infty} K_i(\lambda) d\lambda$ — интегральная интенсивность i -й линии; δ_i — полуширина линии; λ_{0i} — центр линии. Подробнее о моделировании процессов поглощения исследуемых газов см. [2].

В реальных условиях прямое исследование контура линии поглощения представляет весьма сложную задачу, поэтому на практике при определении концентраций атомов и молекул измеряют интегральную интенсивность линий (полос) поглощения. Наибольшее значение интегрального коэффициента поглощения оксида углерода от давления и температуры, рассчитано с использованием аппроксимирующего полинома, который получен на основании статистических данных [3]:

$$\begin{aligned} aptCO_0 &= 5,538 \cdot 10^{-5} & apCO_1 &= -7,2 \cdot 10^{-12} & atCO_1 &= 4,38 \cdot 10^{-9} \\ atCO_2 &= -3,869 \cdot 10^{-12} \\ ACOPT(P, T) &= aptCO_0 + apCO_1 \cdot P + atCO_1 \cdot T + atCO_2 \cdot T^2 \end{aligned} \quad (2)$$

Информация о концентрации ингредиента в выходном сигнале представлена в виде изменения формы спектра. Одной из задач представленной работы является установление теоретической функции преобразования «концентрация → поток» и ей обратная «поток → концентрация». Последняя предназначена для градуировки оптического канала и решения измерительных задач.

Оптический канал разрабатываемого спектрометрического абсорбционного газоанализатора приведен на рисунке 1.

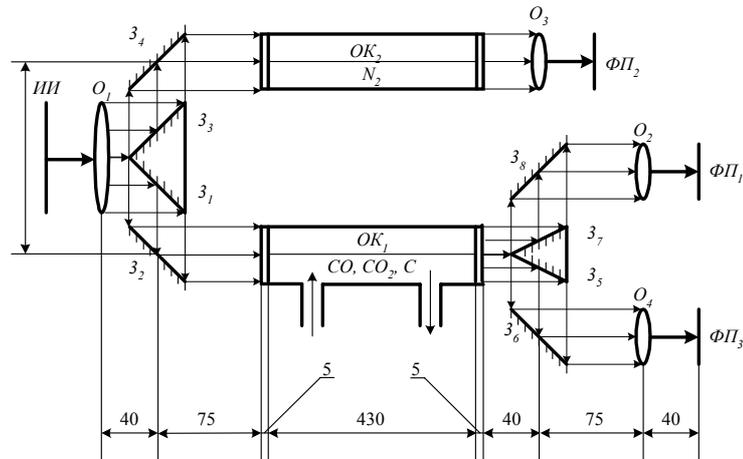


Рисунок 1 – Оптический канал газоанализатора

В разрабатываемой математической модели учтено подавляющее большинство факторов, влияющих на прохождение инфракрасного излучения по кюветам газоанализатора. Оптическая неоднородность канала, которая вызвана применением в канале материалов с различными оптическими свойствами, учитывается коэффициентами преломления. Потери излучения на границах раздела и в средах с различными коэффициентами преломления учитываются коэффициентами отражения и пропускания границами раздела, рассеяния и поглощения излучения в этих средах. В настоящей работе в качестве таких сред выступают оптические линзы, изготавливаемые из специальных материалов: специальных сортов оптического стекла, природных и синтетических кристаллов. Рассматриваемые линзы считаются тонкими (их толщина и диаметр много меньше фокусных расстояний) в связи, с чем потерями на рассеяние и поглощение можно пренебречь. По этой же причине будем считать, что потоки излучения падают на границы раздела сред по нормали к поверхности раздела.

В диапазоне малых углов падения луча на границу раздела, коэффициент отражения практически остается постоянной величиной. Поэтому малое отклонение угла падения на границу раздела обусловленное кривизной линзы практически не влияет на коэффициент отражения. Источник излучения имеет конечные размеры и поток выходящий из линзы оказывается расходящимся, поэтому при определении коэффициента ввода излучения в объектив учитывается угол расхождения луча.

Эффективность ввода излучения в окно фотоприемного устройства оценивается коэффициентом ввода, при этом полагается, что интенсивность потока по сечению однородна. Выходной сигнал фотоприемника представляет собой сигнал напряжения, поскольку фотоприемное устройство - фоторезистор с интегральным усилителем напряжения.

На основе разработанной математической модели построена, с помощью пакета прикладных программ MathCad 2000 Pro, имитационная модель измерителя, учитывающая влияние комплекса возмущающих факторов, и предложены технические решения, обеспечивающие повышение точности и оперативности получения измерительной информации. Структурная схема спектрометрического абсорбционного газоанализатора приведена на рисунке 2.

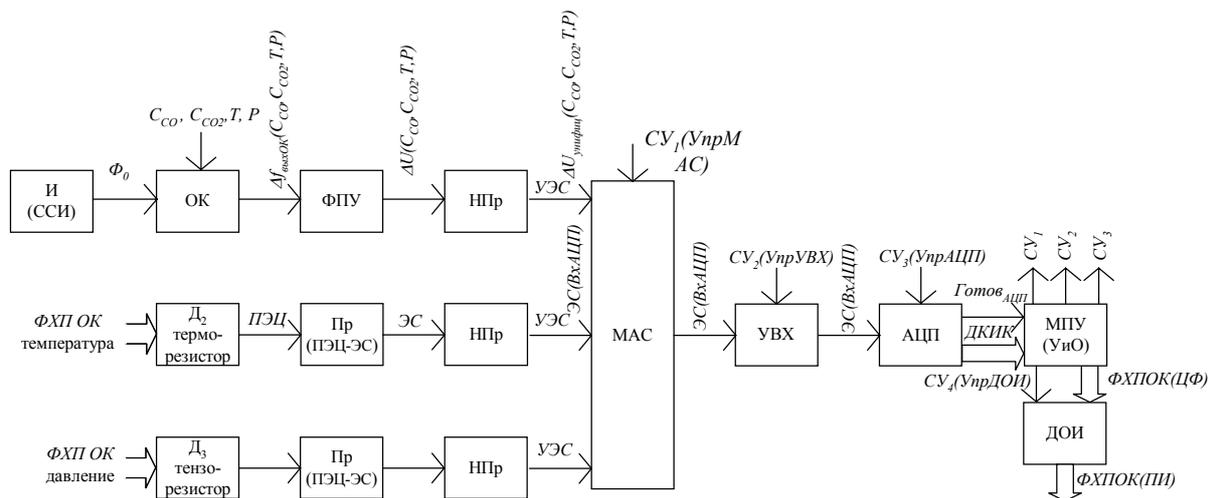


Рисунок 2 - Структурная схема газоанализатора

Для реализации поставленной задачи проектирования комплексного спектрометрического газоанализатора требуется реализации двух пространственных и четырех частотных каналов, на которых будет информация о концентрации исследуемых компонентов анализируемой смеси. Рабочая кювета разрабатываемого газоанализатора подсоединяется к выхлопной трубе глушителя автомобиля. Через кювету проходит выхлопные газы двигателя внутреннего сгорания без предварительной подготовки проб. Аппаратная избыточность введена для реализации алгоритмов компенсации взаимного влияния измеряемых параметров.

Исходя из того, что оптическая плотность исследуемых веществ зависит от температуры и давления, и чтобы учесть эту зависимость, в рабочей кювете предусматриваются датчики температуры и давления, которые подключены к соответствующим измерительным каналам.

Инфракрасное излучение, прошедшее кюветы, поступает на фотоприемник, полученная ЭДС нормируется системой усилителей. Далее информация о концентрации исследуемой смеси подается на мультиплексор аналоговых сигналов, устройство выборки хранения и затем с помощью аналого-цифрового преобразователя преобразуется в цифровой код, который передается в микропроцессор, где информация о концентрации исследуемых газов обрабатывается и передается на систему индикаторов.

Разработанная модель содержит блок формирования оптических сигналов, имитации функционирования электронных узлов, моделирования основных алгоритмов обработки данных и блок оценки метрологических характеристик. При разработке этой системы была промоделирована работа основных функциональных алгоритмов микропроцессорной системы – градуировки и масштабирования данных. Моделирование настройки алгоритма масштабирования имитируется путем подачи на вход модели многоуровневого (16 уровней) калибровочного сигнала (рис.3) и исключения всех видов шумов.

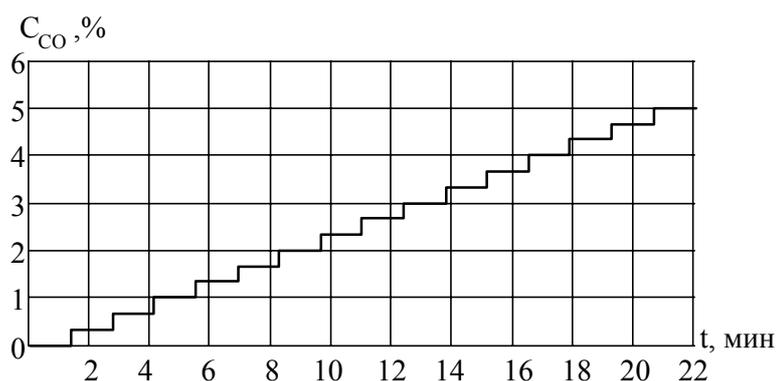


Рисунок 3 – Многоуровневый градуировочный сигнал концентрации оксида углерода

Каждому уровню калибровочного сигнала, как и настроечного, соответствует значение эталона концентрации оксида (диоксида) углерода. Формируются два массива: значений калибровочных уровней и их двоичные эквиваленты выходного кода

АЦП (рис.4), которые представляют собой экспериментальную представленную набором точек градуировочную характеристику $S_{эмл_{CO}}(KOD2)$. Поскольку при цифровой обработке данных выбор системы счисления, в которой выполняется эта обработка, не имеет принципиального значения, то осуществляется преобразование целых двоичных чисел $KOD2$, которыми являются выходные кодовые комбинации АЦП, в десятичные числа $KOD10$. Методом наименьших средних квадратов градуировочную характеристику $S_{эмл_{CO}}(KOD10)$ аппроксимируем степенным полиномом $S_{mod_{CO}}(KOD10)$, представляющим номинальную характеристику преобразования электронной системы по рассматриваемому каналу. Проводятся исследования по выбору степени аппроксимирующего полинома. Градуировочная характеристика $S_{mod_{CO}}(KOD10)$ набор двоичных кодовых комбинаций АЦП ($KOD2$), им соответствующие значения градуировочной характеристики ($S_{mod_{CO}}$) и значения погрешности градуировочной характеристики в точках градуировочных уровней (ε) отличаются от экспериментальной $S_{эмл_{CO}}(KOD10)$ в точках, принадлежащих градуировочным уровням на величину не более половины максимальной погрешности процесса квантования.

Градуировочная характеристика для определенного диапазона температуры, давления и концентрации диоксида углерода ($T=273\div393\text{ K}$, $P=100\div125\text{ кПа}$, $C_{CO_2}=0\div12\%$) относительно линейна и может быть достаточно точно аппроксимирована степенным полиномом уже второй, третьей степени. Градуировочный полином и его коэффициенты приняли значение:

$$\begin{aligned}
 S_{mod_{CO}}(K_{komCO}, T, P, C_{CO_2}) = & A_0(T, P, C_{CO_2}) + \\
 & + A_1(T, P, C_{CO_2}) \cdot K_{komCO} + A_2(T, P, C_{CO_2}) \cdot K_{komCO}^2 + \\
 & + A_3(T, P, C_{CO_2}) \cdot K_{komCO}^3
 \end{aligned} \quad (3)$$

	0		0		0		0
0	0,00000	0	000000001101	0	0,00133	0	0,00133
1	0,33333	1	000001100011	1	0,33803	1	0,00470
2	0,66667	2	000010111000	2	0,67132	2	0,00465
3	1,00000	3	000100001100	3	1,00117	3	0,00117
4	1,33333	4	000101100001	4	1,33543	4	0,00209
5	1,66667	5	000110110110	5	1,67018	5	0,00351
6	2,00000	6	001000001010	6	2,00146	6	0,00146
7	2,33333	7	001001011111	7	2,33715	7	0,00382
8	2,66667	8	001010110011	8	2,66936	8	0,00270
9	3,00000	9	001100000111	9	3,00203	9	0,00203
10	3,33333	10	001101011011	10	3,33514	10	0,00181
11	3,66667	11	001110101111	11	3,66871	11	0,00204
12	4,00000	12	010000000011	12	4,00271	12	0,00271
13	4,33333	13	010001010111	13	4,33715	13	0,00382
14	4,66667	14	010010101010	14	4,66803	14	0,00137
15	1,00000	15	010011111110	15	5,00333	15	0,00333

Рисунок 4 – Значения набора эталонов $S_{этл_{CO}}$, им соответствующий набор двоичных кодовых комбинаций АЦП ($KOD2$), им соответствующие значения градуировочной характеристики ($S_{mod_{CO}}$) и значения погрешности градуировочной характеристики в точках градуировочных уровней (ε)

Показатели точности алгоритма масштабирования приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Показатели точности алгоритма масштабирования спектрометрического газоанализатора

Абсолютное значение максимальной погрешности, $\dot{a}_{max}, \%$	0,037
Приведенное значение максимальной погрешности, $\delta_{max}, \%$	0,729
Среднеквадратическое отклонение погрешности, $\sigma_{\dot{a}}, \%$	0.012
Среднее значение погрешности, $\bar{a} \%$	0.012

Подключив к настроенной модели электронной системы сигнал изменения концентрации исследуемого компонента газовой смеси, который носит характер случайного стационарного процесса, устанавливается погрешность измерения методом сличения результатов измерения со значениями эталонной концентрации, заданного исходной реализацией. Приведение погрешности

выполняется к диапазону изменения исследуемых газов. Показатели точности имитационного моделирования спектрометрического абсорбционного газоанализатора приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Показатели точности имитационного моделирования спектрометрического газоанализатора

Абсолютное значение максимальной погрешности $\bar{a}_{max}, \%$	0,042
Приведенное значение максимальной погрешности $\delta_{max}, \%$	0,830
Среднеквадратическое отклонение погрешности, $\tilde{\sigma}_{\bar{a}}, \%$	0,015
Среднее значение погрешности, $\bar{a} \%$	0,012

На последующих этапах промоделировано функционирование электронной системы в реальных условиях эксплуатации, при воздействии факторов температуры и времени на метрологические характеристики измерителя параметров концентрации газовой смеси.

Разработанная математическая модель бездисперсионного абсорбционного спектрометрического комплексного измерителя параметров выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания позволяет построить на основе современных оптических средств и средств современной микроэлектроники газоанализаторы высокого быстродействия и точности.

Перечень ссылок

1. Зуев В.Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. - М.: Советское радио, 1970. – 496 с.
2. Вовна А.В., Рак А.И., Хламов М.Г. Моделирование ИК-газоанализатора на этапе его проектирования. – VI Всероссийская научная конференция студентов и аспирантов “Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления”. – Таганрог, 2002. – 76-77.
3. Бреслер П.И. Оптические абсорбционные газоанализаторы и их применение. - Л.: Энергия, 1980. – 164 с.