

## Аппроксимация нелинейных статических характеристик оптико-абсорбционных газоанализаторов

д.т.н. проф. Рылов В.А.  
Университет машиностроения  
va\_rylov@mail.ru

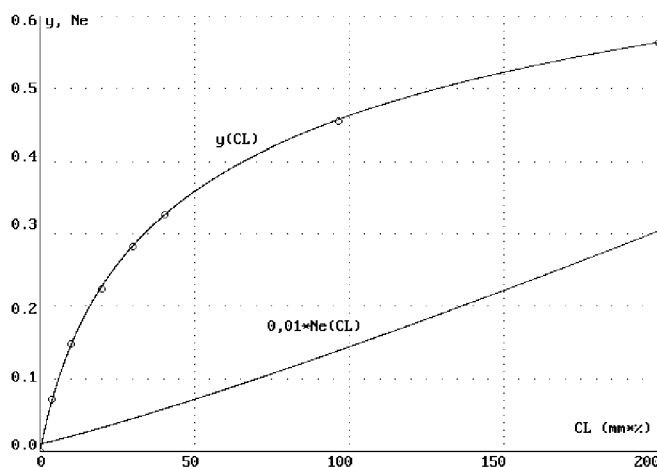
*Аннотация.* Исследована возможность аппроксимации статических характеристик оптико-абсорбционных газоанализаторов дробно-степенной функцией.

*Ключевые слова:* *линеаризация статических характеристик, оптико-абсорбционные газоанализаторы, аппроксимация дробно-степенной функцией.*

Одним из основных методов диагностики и регулировки двигателей автомобильного транспорта является контроль состава выхлопных газов. Для этих целей используются многоканальные автоматические газоанализаторы для определения основных компонентов: оксидов углерода ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ), суммы углеводородов ( $\text{C}_n\text{H}_m$ ), оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ), кислорода ( $\text{O}_2$ ). Нормы содержания вредных примесей для автотранспорта устанавливаются международными и национальными стандартами и постоянно ужесточаются с целью улучшения экологической обстановки в мегаполисах. Для определения  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{C}_n\text{H}_m$  в анализируемой смеси традиционно используется избирательный оптико-абсорбционный метод, являющийся одним из направлений молекулярной спектроскопии.

Метод основан на измерении поглощения излучения в области среднего ИК диапазона (1,5 – 10 мкм), где большинство газов имеет характерные полосы поглощения. Для обеспечения необходимой избирательности применяются интерференционные оптические фильтры, которые пропускают ИК излучение только в узкой области, совпадающей со спектральной полосой поглощения выбранного компонента. Оптический блок газоанализатора содержит малоинерционный модулируемый источник ИК излучения, кювету с анализируемой пробой и детекторы излучения с интерференционными фильтрами.

К особенностям такого прибора следует отнести то, что для измерения трех различных компонентов применяется общая кювета заданной длины, что создает определенные трудности при выборе оптимальной оптической плотности для каждого компонента. Это связано с тем, что каждый из них отличается от других как диапазоном измерения ( $\text{C}_n\text{H}_m$  – до 1%;  $\text{CO}$  – до 5%;  $\text{CO}_2$  – до 20%), так и интенсивностью полосы поглощения. Следствием этого являются нелинейные статические характеристики для отдельных компонентов. Пример нелинейной статической характеристики для измерительного преобразователя на  $\text{CO}_2$  представлен на рисунке 1



**Рисунок 1 – Статическая характеристика измерительного оптико-абсорбционного преобразователя на  $\text{CO}_2$  (верхняя кривая) и критерий нелинейности (нижняя кривая) в зависимости от оптической толщины слоя анализируемой пробы**

По горизонтальной оси на графике отложена оптическая толщина газового слоя – произведение концентрации определяемого компонента (%) на длину оптической кюветы (мм); статические характеристики будут одинаковы для одного преобразователя CO<sub>2</sub> с диапазоном измеряемых концентраций 20 % и длиной кюветы 10 мм и для другого – с диапазоном 100 % и длиной кюветы 2 мм.

По вертикальной оси отложена величина относительного поглощения  $y$ , равная отношению уменьшения выходного сигнала  $U$  к начальному сигналу при  $C = 0$ :

$$y(C) = \frac{U(0) - U(C)}{U(0)}. \quad (1)$$

Для количественной оценки нелинейности статической характеристики используется критерий нелинейности, который равен отношению значений производной в начале и конце характеристики:

$$Ne = \frac{y'|_{C=0}}{y'|_{C=C_{max}}}. \quad (2)$$

Обычно не применяют нелинейные статические характеристики, для которых критерий превышает величину 10 – 15; для этого используют более короткие газовые кюветы; при более высоких значениях критерия существенно возрастают погрешности в конце диапазона.

С применением микропроцессоров в аналитических приборах одной из функций микропроцессора стала линеаризация статической характеристики. Общую схему преобразования можно представить в виде нескольких последовательных стадий (блоков):

- получение электрического аналогового сигнала на выходе первичного измерительного преобразователя  $U(C)$ ;
- усиление аналогового сигнала и преобразование его в цифровой сигнал  $y(C)$ ;
- нелинейное преобразование цифрового сигнала (линеаризация);  $N(y)$ ;
- масштабирование сигнала, индикация в единицах измеряемой величины  $C = KN$

Экспериментальные данные представляют значения выходного сигнала при различных концентрациях диоксида углерода в смеси (таблица 1)

Таблица 1

Концентрация, %	Выходной сигнал	Отн. изм. сигн.
C0 0,00	U0 2618	y0 0,0000
C1 1,82	U1 2429	y1 0,0722
C2 4,92	U2 2231	y2 0,1478
C3 10,00	U3 2030	y3 0,2246
C4 15,00	U4 1878	y4 0,2826
C5 20,10	U5 1763	y5 0,3266
C6 47,7 (?)	U6 1425	y6 0,4557
C7 100	U7 1142	y7 0,5638

На рисунке 2а представлены результаты аппроксимации функции линеаризации  $C(y)$  по стандартному алгоритму полиномиальной аппроксимации *Excel*. Функция линеаризации  $C(y)$  описывается полиномом 4 степени и содержит 5 параметров (коэффициентов):

$$C(y) = 0,35732 + 0,598157y + 2,926234y^2 - 0,906340y^3 + 0,166637y^4. \quad (3)$$

Стандартный алгоритм аппроксимации *Excel* компенсирует погрешности (и ошибки) экспериментальных данных дополнительными членами полинома более высоких степеней; в результате чего получается очень высокий коэффициент корреляции (5 девяток). Однако эта функция аппроксимации не является «гладкой», о чем свидетельствует наличие членов полинома с отрицательными коэффициентами.

Другой алгоритм основан на аппроксимации экспериментальных данных «гладкими» функциями, в качестве которых могут быть использованы гиперболические степенные

функции типа:

$$C(y) = K_2 \cdot \left[ \frac{1}{(1 - K_3 \cdot y)^r} - 1 \right]; y = 1 - \frac{U}{U_0}; r - \text{«степень» гиперболы} \quad (4)$$

Одно из основных свойств «гладких» функций заключается в том, что во всем диапазоне изменений аргумента  $(0, 1/K_3)$  их производные (любого порядка) не обращаются в нуль. Примерами таких «гладких» функций может служить гипербола:

$$C(y) = K_2 \cdot \left[ \frac{1}{1 - K_3 \cdot y} - 1 \right] = K_2 \cdot \frac{K_3 \cdot y}{1 - K_3 \cdot y}; r = 1, \quad (5)$$

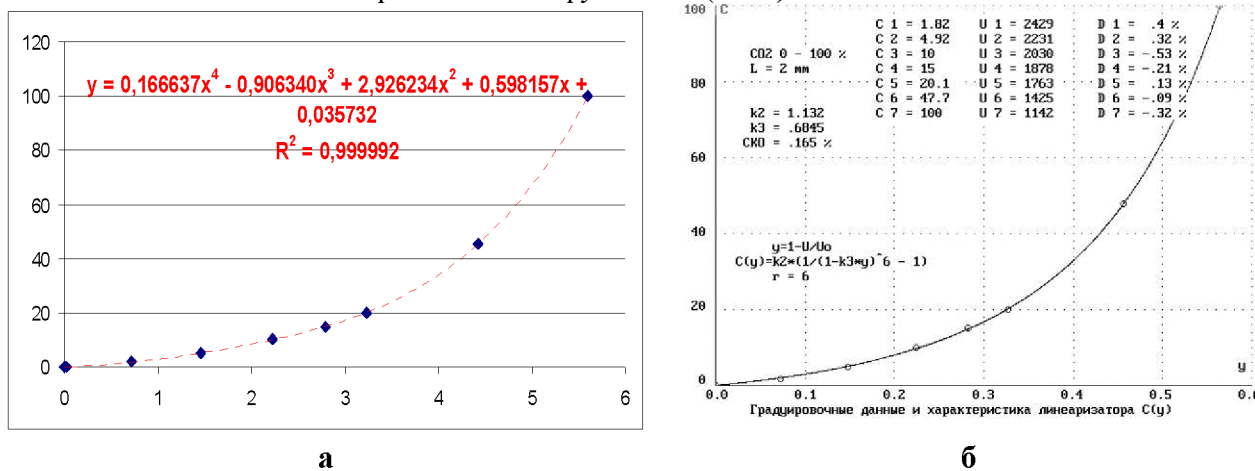
или экспонента

$$C(y) = K_2 \cdot [\exp(K_3 \cdot y) - 1]; r \rightarrow \infty. \quad (6)$$

Интуитивно понятно, что нелинейная статическая характеристика реального измерительного преобразователя является «гладкой» функцией (как согнутая упругая линейка), а отклонения от номинальной гладкой функции связано с погрешностями эксперимента. Поэтому такая аппроксимация выявляет погрешности эксперимента: увеличение погрешности в одной экспериментальной точке в несколько раз по сравнению с остальными свидетельствует об ошибочном экспериментальном результате, требующем корректировки.

Гиперболические степенные функции содержат кроме показателя степени  $r$  только 2 масштабных коэффициента, что дает существенные преимущества при корректировке коэффициентов статической характеристики с применением ПГС.

На рисунке 2б представлены результаты аппроксимации приведенных экспериментальных данных степенной гиперболической функцией ( $r = 6$ ):



**Рисунок 2 – Определение параметров функции линейризации при аппроксимации полиномом 4 степени (Excel) –(а) и степенной гиперболической функцией (б)**

Особенность данного эксперимента заключалась в том, что для всех экспериментальных точек, кроме С6, использовались ПГС с известной погрешностью аттестации; смесь С6 получалась на неаттестованной установке динамического смещения, поэтому значение концентрации возможно было оценить только с большой погрешностью. В результате обработки данных необходимо было определить 4 параметра: показатель степени  $r$ , масштабные коэффициенты  $K_2$ ,  $K_3$  и значение концентрации  $C_6$ .

С учетом этого была принята следующая методика нахождения параметров линейрирующей функции:

- 1) задавалось значение показателя степени гиперболы  $r$ ;
- 2) по методу наименьших квадратов определялись значения параметров  $K_2$ ,  $K_3$  и значение СКО для данной аппроксимирующей кривой;

3) затем проводилась корректировка (подгонка) значения концентрации  $C_6$ , при котором значение СКО достигало минимального значения; это значение  $C_6$  принималось как оптимальное для данного значения показателя степени  $r$ .

В результате «подгонки» при значении  $C_6 = 47,7\%$  получилось минимальное значение СКО = 0,165 %, при этом значения параметров составили  $K_2 = 1,132$ ;  $K_3 = 0,6845$

На рисунке 2б представлены экспериментальные точки и график аппроксимирующей функции линеаризации. В таблице для каждой точки приведены значения концентрации, выходного сигнала и погрешность аппроксимации. Аналогичные результаты были получены для других значений параметра  $r$ .

В сводной таблице 2 приведены значения СКО и  $C_6$  для функций линеаризации, лежащих в диапазоне от гиперболы до экспоненты. Минимальное значение СКО, определяющее выбор оптимальной функции (параметр  $r$ ), находится на уровне 0,17 % и соответствует «гиперболам 5 – 7 степени»

Таблица 2

$r$	$C_6$	СКО %	$K_3$	
$\infty$	49,6	0,285	6,198	Экспонента
8	48,2	0,177	0,5611	
7	48,0	0,168	0,6166	
6	47,7	0,165	0,6845	
5	47,4	0,170	0,7682	
4	46,9	0,198	0,8751	
3	46,2	0,259	1,0147	
2	45,0	0,384	1,2035	Гипербола
1	42,7	0,630	1,462	

На основании проведенной обработки результатов для конкретного измерительного преобразователя можно сделать следующие общие выводы:

- дробно-степенные функции являются удобным математическим аппаратом для аппроксимации нелинейных статических характеристик и обратных им функций линеаризации;
- функции содержат два масштабных коэффициента и показатель степени;
- наличие одного параметра ( $K_2$ ) в виде сомножителя существенно упрощает алгоритм определения оптимальных параметров функции аппроксимации по методу наименьших квадратов;
- метод не является критичным по отношению к выбору показателя степени  $r$ , как следует из таблицы, при изменении параметра  $r$  в диапазоне от 4 до 8 СКО погрешности аппроксимации не превышает 0,2 %, что существенно меньше основной приведенной погрешности аналитических измерительных преобразователей (обычно 2 – 5 %).

**Методы интенсификации процессов кристаллизации при криогранулировании жидкофазных суспензий в жидком азоте. Исследование окрестности фронта смены режимов кипения**

к.т.н. проф. Белуков С.В., Малышев Р.Е.  
 Университет машиностроения  
 8(499)267-07-14

*Аннотация.* В данной статье рассмотрены методы интенсификации при процессе криогранулирования, проведен расчет длины блока аппарата криогранулирования, исследован фронт смены режимов кипения с затухающего пленочного на затухающее пузырьковое.

*Ключевые слова:* криогранулирование, суспензия, кристаллизация, фронт,