

А.В. Белоношко

(Украина, Конотоп, НИПКИ «Автоматуглерудпром»)

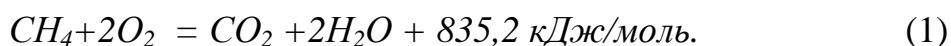
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДАТЧИКОВ МЕТАНА

Наиболее широко распространенным и изученным методом контроля содержания метана в рудничной атмосфере является термokatалитический, реализованный в Украине и многих других странах в серийно выпускаемых переносных, встраиваемых и стационарных приборах контроля метана, на основе которых еще в 60-х годах прошлого столетия создана автоматическая газовая защита (АГЗ) на угольных шахтах [1]. Внедрение АГЗ в угольной промышленности Украины способствовало тому, что количество смертельных случаев на 1 млн.т. добычи угля уменьшилось с 5 человек в 1960 году до 2 чел в период с 1970–1990гг. [2]. Следует отметить также, что приборы, в которых реализован термokatалитический метод измерения метана, получили широкое распространение из-за их простоты и освоенности в массовом производстве [3].

В то же время следует отметить, что термokatалитические датчики метана, используемые в разнообразных приборах контроля, отличаются своим конструктивным исполнением и параметрами чувствительных элементов, в том числе их размерами, формой, сопротивлением, энергопотреблением и др. Вопросы оптимизации параметров чувствительных элементов до настоящего времени в достаточной мере не изучены. Не исчерпаны также возможности совершенствования датчиков метана.

Целью настоящей публикации является обоснование оптимальных параметров чувствительных элементов термokatалитических датчиков метана методами планирования эксперимента.

В большинстве известных случаев термokatалитический датчик состоит из каталитически активного (рабочего) и сравнительного чувствительных элементов [1]. Активный элемент датчика является катализатором глубокого окисления и реакция окисления на нем идет также, как и при обычном горении метана в соответствии с известной формулой



Одной из важнейших задач по совершенствованию чувствительных элементов датчиков является оптимизация их конструктивных решений и технологии изготовления для уменьшения потребляемой мощности и повышения стабильности метрологических и других характеристик.

В задаче оптимизации в общем случае можно выделить ряд основных этапов [5]:

- системный анализ задачи измерения;

- системный анализ задачи оптимизации измерительно-информационной системы (ИИС) или ее элементов;
- обоснование исходных данных для синтеза ИИС или ее элементов;
- эвристический синтез ИИС;
- построение математической модели ИИС;
- выбор метода оптимизации;
- определение критерия оптимизации ИИС или ее элементов.

Приведенная последовательность этапов оптимизации несколько условна и может меняться исходя из конкретной задачи оптимизации.

Системный анализ задачи измерения содержания метана в атмосфере достаточно полно отражен в известных источниках [1,2,6]. Системный анализ задачи оптимизации проводится посредством анализа влияния на чувствительные элементы их конструктивных особенностей (рис.1).

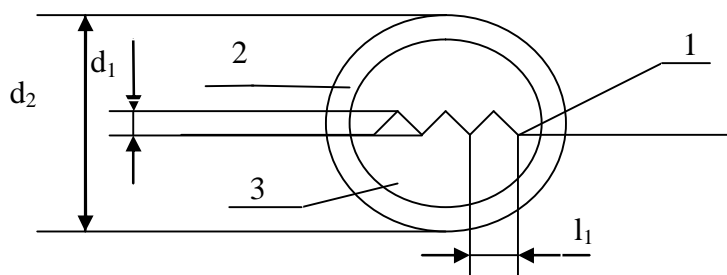


Рис 1. Конструкция чувствительного элемента термокаталитического датчика:
1 – спираль из платиновой проволоки; 2 – слои катализаторов; 3 – слои γ -оксида алюминия

Для чувствительного элемента датчика можно выделить следующую совокупность основных конструктивных и технологических параметров, влияющих на характеристику датчика:

- число витков спирали $W = X_1$;
- диаметр витка спирали $d_1 = X_2$;
- шаг витка спирали $l_1 = X_3$;
- количество слоев γ -оксида алюминия, из которого сформирован шарик вокруг спирали, $n_1 = X_4$;
- диаметр шарика $d_2 = X_5$;
- количество слоев катализаторов наносимых на шарик $n_2 = X_6$;
- диаметр и длина газообменного отверстия $d_3 = X_7$, $l_2 = X_8$ соответственно для конструкции датчика в соответствии с [7];
- гранулометрический состав суспензии из γ -оксида алюминия для формирования шарика X_9 ;
- текучесть суспензии из γ -оксида алюминия X_{10} ;
- температура термообработки каждого слоя суспензии наносимого на спираль $t_1 = X_{11}$;
- температура термообработки каждого слоя катализатора наносимого на шарик $t_2 = X_{12}$.

Обоснование исходных данных для синтеза оптимального чувствительного элемента проводим на основе более детального анализа конструкций чувстви-

тельных элементов разных производителей (ОАО "Красный металлист", ЧП "Укрсенсор" (Украина), ЗАО "Электроточприбор" (Россия)). Исходя из анализа, определяется диапазон возможных изменений указанных выше значений конструктивных и технологических параметров в ходе экспериментальной оптимизации: $X_1 = W = (6...12)$ вит; $X_2 = d_1 = (0,15...0,3)$ мм, $X_3 = l_1 = (30...40)$ мкм, $X_4 = n_1 = (4...8)$ слоев, $X_5 = d_2 = (0,25...0,4)$ мм, $X_6 = n_2 = (6...12)$ слоев, $X_7 = l_2 = (0,5 \div 2,5)$ мм, $X_8 = d_3 = (1 \div 2,5)$ мм, $X_9 = (|-10|...|-40|)$ мкм, $X_{11} = t_1 = (500...1000)$ °С, $X_{12} = t_2 = (350...600)$ °С.

Большое значение для экспериментального определения оптимальных конструктивных и технологических параметров для производства чувствительных элементов является обоснованный выбор критерия (или совокупности критериев) оптимизации K . С точки зрения известных подходов, для решения этой задачи возможно применения эвристического синтеза, основывающегося на коллективном опыте разных разработчиков, инженерной инструкции, опыте производства и эксплуатации [8]. Исходя из этого для поставленной задачи может быть принят комплексный критерий оптимизации K_0 чувствительных элементов. В частности, это может быть минимальная потребляемая мощность, независимость выходного сигнала с датчика от изменения напряжения питания от U_{\min} до U_{\max} , чувствительность не менее какого то заданного значения и др.

Как видно, критерий оптимизации чувствительного элемента – многофакторная функция, зависящая как минимум от 8 конструктивных (внутренних) и 4-х технологических (внешних) параметров. Поэтому весьма важным в этом случае становится вопрос методики проведения экспериментальной оптимизации. Проведение классического эксперимента, когда поочередно меняется один из факторов а остальные фиксируются, требует больших затрат времени без гарантии достижения максимально возможного успеха при оптимизации.

Наиболее приемлемыми для многофакторного эксперимента являются методы оптимизации, основанные на математических методах планирования эксперимента [5].

Среди этих методов наиболее распространены метод крутого восхождения по поверхности отклика, метод движения по градиенту, различные модификации симплекс метода, и в частности, симплекс-метод планирования эксперимента с переменным размером симплекса, как наиболее приемлемого для оптимизации объектов в многомерном факторном пространстве варьируемых переменных [8].

В соответствии с выбранным методом для указанного выше набора внутренних параметров чувствительного элемента ($W, d_1, L_1, n_1, L_2, d_2, n_2, d_3, X_9$) и внешних параметров (X_{10}, t_1, t_2) определяют основной уровень параметров

$$X_i^0 = \frac{X_{i \max} + X_{i \min}}{2} \quad (2)$$

и интервал их варьирования

$$\Delta X_i = X_i^0 - X_{i \min} \cdot \quad (3)$$

Рассчитанные в соответствии (2) и (3) значения основных уровней и интервалов варьирования конструктивных и технологических параметров используем для расчета регулярной конфигурации из $(m+1)$ точек правильного симплекса – плана проведения экспериментальной оптимизации.

План исходной серии $(m+1)$ экспериментов в кодированных единицах приведен в [5]. Для перевода плана эксперимента в натуральных параметрах X_i вычисляют:

$$X_i = V_i \Delta X_i + X_i, \quad (5)$$

где V_i – i -е значение параметра в точке эксперимента в кодированном виде.

Значение V_i приведены в [5], а результаты расчета значений X_i^0 , ΔX_i , X_i для плана эксперимента приведены соответственно в табл. 1-3.

Таблица 1

Значения величин X_i^0 при проведении эксперимента

X_1^0	X_2^0	X_3^0	X_4^0	X_5^0	X_6^0	X_7^0	X_8^0	X_9^0	X_{10}^0	X_{11}^0	X_{12}^0
ВИТК.	мм	мкм	слоев	мм	слоев	мм	мм	мкм	мм/с	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
9	0,225	35,0	6	0,325	9	1,75	1,5	-25		750	475

Таблица 2

Значения величин ΔX_i при проведении эксперимента

ΔX_1	ΔX_2	ΔX_3	ΔX_4	ΔX_5	ΔX_6	ΔX_7	ΔX_8	ΔX_9	ΔX_{10}	ΔX_{11}	ΔX_{12}
ВИТК.	мм	мкм	слоев	мм	слоев	мм	мм	мкм	мм/с	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
6,0	0,075	5,0	2	0,075	3	0,75	1,0	-15		250	125

Таблица 3

Значения величин X_i при проведении эксперимента

X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}
ВИТК.	мм	мкм	слоев	мм	слоев	мм	мм	мкм	мм/с	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
12	0,247	36	6.32	0,345	9,0	1.82	1,583	-26		765	482
6	0,247	36	6.32	0,345	9,0	1.82	1,583	-26		765	482
9	0,182	36	6.32	0,345	9,0	1.82	1,583	-26		765	482
9	0,225	34,7	6.32	0,345	9,0	1.82	1,583	-26		765	482
9	0,225	35	4,87	0,345	9,0	1.82	1,583	-26		765	482
9	0,225	35	6	0,291	9,0	1.82	1,583	-26		765	482
9	0,225	35	6	0,325	7,04	1.82	1,583	-26		765	482
9	0,225	35	6	0,325	9	0,775	1,583	-26		765	482
9	0,225	35	6	0,325	9	1,75	0,917	-26		765	482
9	0,225	35	6	0,325	9	1,75	1,5	-16		765	482
9	0,225	35	6	0,325	9	1,75	1,5	-25	-3	765	482
9	0,225	35	6	0,325	9	1,75	1,5	-25		575	482
9	0,225	35	6	0,325	9	1,75	1,5	-25		750	402

По конструктивным и технологическим параметрам, приведенным в табл. 3, изготавливают $(m+1)$ серий из 20 рабочих и сравнительных элементов датчика метана. Изготовление ведется на оборудовании и по технологическим процессам, применяемым на ОАО «Красный металлист» (г. Конотоп) для серийного производства. Сравнительные чувствительные элементы отличаются от рабочих только отсутствием на их поверхности катализатора. В соответствии с принятым технологическим процессом из чувствительных элементов собирают датчики метана, которые после тренировки в метановоздушных смесях испытываются на установке и по методике приведенной в [2], определяют при этом номинальную потребляемую мощность, чувствительность и изменение выходного напряжения с датчика при изменении напряжения питания от U_{max} до U_{min} (например от 2 до 1,7 В для датчиков метана, применяемых в переносных приборах).

Для каждой серии $(m+1)$ датчиков вычисляют среднее значение чувствительности

$$\bar{U}_{вых} = \frac{\sum_{n=1}^{20} U_{выхi}}{20}, \text{ мВ/\% CH}_4, \quad (6)$$

потребляемой мощности

$$\bar{P}_{номр} = \frac{\sum_{n=1}^{20} P_i}{20}, \text{ Вт}, \quad (7)$$

изменения выходного сигнала при изменении $U_{пит}$ от U_{max} до U_{min}

$$\bar{\Delta U}_{вых} = \frac{\sum_{n=1}^{20} \Delta U_{выхi}}{20}, \text{ мВ}. \quad (8)$$

По результатам расчетов определяется серия датчиков, имеющая худшие комплексные критерии оптимизации, и из матрицы данных табл. 3 вычеркивается строка, соответствующая конструктивным и технологическим параметрам худшей серии датчиков. По результатам экспериментальной оптимизации и расчетов, наихудшим по комплексному критерию оптимизации K_0 является серия датчиков с конструктивными и технологическими параметрами, соответствующие первой строке табл. 1. Она исключается из таблицы.

По оставшимся в табл. 3 данным рассчитываются в соответствии [5] конструктивные и технологические параметры для изготовления $(m+2)$ -й серии чувствительных элементов:

$$X_i^1 = 2\bar{X}_1 - X_{ik}, \quad (9)$$

где \bar{X}_1 – среднее значение i -го конструктивного (технологического) параметра за исключением наихудшего по критерию оптимизации X_i параметра.

В результате расчетов согласно (9) получаем значения конструктивных и технологических параметров для $(m+2)$ -й серии чувствительных элементов: $W = X_1 = 8,75$ вит ≈ 9 вит; $d_1 = X_2 = 0,223$ мм; $l_1 = X_3 = 35,2$ мкм; $n_1 = X_4 = 5,98$ слоев ≈ 6 слоев; $d_2 = X_5 = 0,328$ мм; $n_2 = X_6 = 8,83$ слоя ≈ 9 слоев; $d_3 = X_7 = 1,7$ мм; $l_2 = X_8 = 1,5$ мм; $X_9 = |-24,9|$ мкм; $t_1 = X_{11} = 748$ °С; $t_2 = X_{12} = 475$ °С.

Полученные данные реализуют при изготовлении $(m+2)$ серии чувствительных элементов, изготавливают из них $(m+2)$ -ю серию датчиков и по вышеописанной процедуре определяют комплексный критерий K_0 оптимизации изготовленной серии.

Дальнейшая оптимизация, если критерий оптимизации $(m+2)$ -й серии датчиков выше полученных ранее, может идти по процедуре, описанной выше до получения приемлемого или заданного критерия оптимизации. Однако в этом случае возможен выход на локальный, не лучший оптимум параметров датчиков. Поэтому, после сопоставления критериев $(m+2)$ -й серии датчиков с рассчитанными ранее, возможны два варианта ведения экспериментальной оптимизации. Если $(m+2)$ -й опыт удачен, т.е., когда критерий оптимизации $(m+2)$ -й серии датчиков $K_0^{(m+2)}$ больше максимального значения критерия оптимизации K'_0 для серий датчиков, изготовленных по параметрам согласно табл. 3, т.е. если $K_0^{(m+2)} > K'_{0max}$, производят расширение симплекса, для чего определяют параметры X_i^2 для изготовления $(m+3)$ -ей серии чувствительных элементов в соответствии с [5]

$$X_i^2 = 3\bar{X}_1 - 2X_{ik}. \quad (10)$$

Если $K_0^{(m+2)} < K_{0max}$, то производят сжатие симплекса. Для чего определяют параметры X_i^3 для изготовления $(m+3)$ -й серии чувствительных элементов:

$$X_i^3 = 0,5\bar{X}_1 - 0,5X_{ik}. \quad (11)$$

Эксперимент по оптимизации по описанной методике ведется до тех пор, пока симплекс не начнет вращаться вокруг точки, давшей максимальное значение критерия оптимизации. Для определения возможности улучшения критерия оптимизации рекомендуется [5,8] кроме описанных процедур использовать следующие приемы: исключение исходной матрицы (табл. 3) строки, давшей значение $K_0 > K_{0min}$, образование нового правильного симплекса, меняя исходный порядок внешних и внутренних параметров, образование набора из $2m$ версий комплекс-метода и др.

В процессе экспериментальной оптимизации получены следующие значения внутренних и внешних параметров для встраиваемых измерителей и анализаторов метана: число витков спирали $W = (7...8)$ вит.; диаметр витка спирали $d_1 = (0,18...0,25)$ мм; шаг витка спирали $l_1 = (28...35)$ мкм; количество слоев γ -окси алюминия $n_1 = (6...9)$ слоев; диаметр шарика $d_2 = (0,25...0,33)$ мм;

количество слоев катализатора $n_2 = (6...10)$ слоев; диаметр газообменного отверстия $d_3 = (0,8...2,0)$ мм; температура термообработки суспензии $t_1 = (550...990)$ °С; температура термообработки катализатора $t_2 = (450...650)$ °С.

Экспериментальная проверка датчиков, изготовленных по полученным значениям внутренних и внешних параметров чувствительных элементов, в переносных и встраиваемых приборах, показала существенное повышение основных технических характеристик указанных приборов, уменьшение брака в процессе изготовления датчиков.

Таким образом, в результате проведенных исследований предложена методика одновременной экспериментальной оптимизации конструктивных и технологических параметров чувствительных элементов и датчика горючих газов. Выбор оптимизируемых параметров осуществлен на основе ранжирования факторов влияющих на характеристики чувствительных элементов и изготовленных из них датчиков.

Дальнейшая оптимизация чувствительных элементов может проводиться по предложенной методике для другой группы влияющих факторов, значений их основных уровней и интервала варьирования этих факторов. Предложенный подход может быть применен при оптимизации датчиков, построенных на других принципах измерения, электрических схем, режимов их работы, конструктивного исполнения различных электротехнических, электронных устройств и систем, алгоритмов их функционирования и иных задач. Предложенная методика оптимизации более чем на порядок сокращает длительность проведения экспериментальной оптимизации чувствительных элементов при достижении экстремума принятых критериев оптимизации. Методика позволяет оптимизировать чувствительные элементы и конструкции датчика по другим критериям оптимизации: стабильности выходного сигнала во времени, минимальная чувствительность к влияющим факторам (температура, давление, влажность, скорость воздушного потока, избирательность, потребляемую мощность и др.).

Список литературы

1. Карпов Е.Ф. Басовский Б.И. Биренберг И.Э. Автоматическая газовая защита и контроль рудничной атмосферы. – М.: Недра, 1984. – 285 с.
2. Голинько Н.И., Котляров А.К., Белоножко В.В. Контроль взрывоопасных горных выработок шахт. – Днепропетровск: Наука и образование, 2004. – 207 с.
3. Котляров А.К. Влияние процессов переоснащения угольных шахт средствами безопасности на состояние травматизма и аварийности в отрасли // Сб. науч. тр. НГУ. – 2003. – № 17, том 2. – С. 400-403.
4. Рид Р., Шервуд Т. Свойства жидкостей и газов. – М.: Гостопиздат, 1964. – 343 с.
5. Онищенко А.М. Оптимизация приборов для контроля состава вещества. – М: Машиностроение, 1990. – 301 с.
6. Приборы шахтные газоаналитические, общие технические требования, методы испытания. ГОСТ 24032-80. – М.: Госстандарт, 1980. – 34 с.
7. Патент України 61224А, МК G01N25/22. Спосіб вимірювання вмісту горючих газів в шахтній атмосфері та пристрій для його реалізації / В.В. Білоножко, В.П. Білоножко, В.І. Голінько та ін. // Опубл. 17.11.03. Бюл. № 11.
8. Зедишидзе И.Г. Планирование эксперимента для исследования многофакторных систем. – М.: Наука, 1976. – 390 с.