

Ю. М. КОЛПАКОВ, Ю. Я. МЕДВЕДЕВ

(Красноярск)

О МИНИМУМЕ ПОРОГА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ГАЗОАНАЛИЗАТОРОВ С ФАЗОМЕТРИЧЕСКОЙ СХЕМОЙ

В литературе [1—4] уже неоднократно писалось о применении фазометрических схем в оптических абсорбциометрах. Рассмотрены некоторые зависимости параметров результирующего сигнала (сигнала, обусловленного суммарным воздействием на фотоприемник эталонного светового пучка и пучка, прошедшего через исследуемый образец) от параметров оптической части прибора и пропускания света исследуемым образцом [5]; предложенные графики позволяют осуществлять оптимальный выбор параметров оптической части с целью обеспечения линейности шкалы.

Использование оптических абсорбциометров в качестве анализаторов состава газовых смесей нередко связано с необходимостью измерения очень малых изменений коэффициента пропускания. Это положение справедливо, например, по отношению к анализаторам состава воздуха производственных помещений. В подобных случаях порог чувствительности обычно является одной из важнейших характеристик измерительного устройства.

Если остальные условия неизменны, то минимум порога чувствительности, очевидно, достигается при таких значениях параметров оптической части, при которых имеет место минимум отношения шума выходного сигнала к производной выходного сигнала по определяемому параметру (по концентрации).

Для произвольно заданной формы сигнала, поступающего с фотоприемника (нередко после усиления) на фазочувствительный детектор, поставленная задача очень сложна и может быть решена лишь с использованием приближенных методов расчета. При этом, как показывает теория синхронного детектирования [6], значения параметров оптической части, оптимальные по отношению к сигналу в целом, не являются оптимальными по отношению к его гармоникам. Более того, выходной сигнал фазочувствительного детектора, образуемый в результате сложения постоянных составляющих, обусловленных наличием одинаковых гармоник у входного сигнала и вектора коммутации, будет в общем случае содержать некоторую часть слагаемых с противоположным знаком. Последнее обстоятельство объясняется тем, что всякий реальный гармонический детектор не является строго гармоническим; что же касается фазометрических схем оптических абсорбциометров, то здесь чаще предпочитают двухполупериодные детекторы релейного типа, как более стабильные в работе.

Можно показать, что наибольшие возможности уменьшения порога чувствительности обеспечиваются при синусоидальной форме сигнала.

На векторной диаграмме (см. рисунок), поясняющей ход дальнейших рассуждений, применены следующие обозначения: U — сигнал, обусловленный световым пучком, прошедшим через исследуемый образец; $U_э$ — сигнал, обусловленный эталонным световым пучком; $U_г$ — результирующий сигнал (результат сложения U и $U_э$); $U_{оп}$ — опорный сигнал; U_0 и $U_{\Sigma 0}$ — значения U и $U_э$ в начале диапазона измерения. Обозначения сдвигов фаз φ , ψ и δ легко уясняются непосредственно из чертежа.

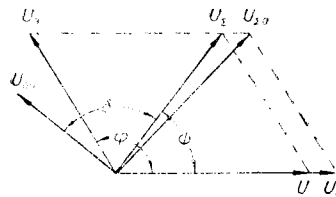
При синусоидальной форме сигналов U и $U_э$ постоянная составляющая выходного сигнала фазочувствительного детектора может быть представлена выражением [6]

$$U_{\text{ВМХ}} = k \sqrt{U_э^2 + U^2 + 2 U_э U \cos \varphi \cos \delta.}$$

или после введения обозначений: $\frac{U_0}{U_э} = m$; $\frac{U_0 - U}{U_0} = h$

$$U_{\text{ВМХ}} = k U_э \sqrt{1 + m^2 (1 - h)^2 + 2m(1 - h) \cos \varphi \cos \delta}$$

(здесь k — коэффициент пропорциональности).



Сдвиг фазы δ между результирующим и опорным сигналами выбирается таким, чтобы в начале диапазона измерения $\delta = \delta_0 = 90^\circ$. При этом условии

$$U_{\text{ВЫХ}} = k U_0 \sqrt{1 + m^2 (1 - h)^2 + 2m(1 - h) \cos \varphi} \sin \left(\arctg \frac{\sin \varphi}{(1 - h)m + \cos \varphi} - \arctg \frac{\sin \varphi}{m + \cos \varphi} \right) = k U_0 \sqrt{1 + m^2 (1 - h)^2 + 2m(1 - h) \cos \varphi} \times \frac{hm \sin \varphi}{\sqrt{1 + m^2 (1 - h)^2 + 2m(1 - h) \cos \varphi} \sqrt{1 + m^2 + 2m \cos \varphi}} \quad (1)$$

Чтобы выходная величина $U_{\text{ВЫХ}}$ определялась только отношением U и U_0 , амплитуда входного сигнала U_0 детектора должна быть стабилизирована (например, введением в схему автоматической регулировки усиления). Для распространенного в практике частного случая, когда $m=1$, оптимальное значение φ , соответствующее заданному интервалу изменения h , может быть найдено аналитически.

Так как эффект воздействия собственно шумов на выходной сигнал можно считать независимым от значения φ , то для достижения минимума порога чувствительности достаточно обеспечить максимум производной выходного сигнала по концентрации. Из закона поглощения света (закона Ламберта — Бэра) следует, что чувствительность прибора с дифференциальной схемой падает с увеличением концентрации. То же самое имеет место и в случае фазометрической схемы при $m \leq 1$. Поэтому расчет оптимального значения φ целесообразно производить по отношению к верхнему пределу измерения.

Можно показать, что при оптимальном значении φ наименьшая величина амплитуды $U_{\text{ВЫХ}}$ результирующего сигнала соответствует верхнему пределу измерения. Если амплитуда U_0 стабилизирована и равна своему наименьшему значению, то оптимальное значение φ определяется условием

$$\frac{d}{d\varphi} \left(\frac{d U_{\text{ВЫХ}}}{d C} \right)_{C=C_m} = \frac{d}{d\varphi} \left(\frac{d U_{\text{ВЫХ}}}{dh} \frac{dh}{d C} \right)_{C=C_m} = \frac{d}{d\varphi} \left\{ k U_0 \sqrt{1 + (1 - h_m)^2 + 2(1 - h_m) \cos \varphi} \times \frac{d}{dh} \left[\frac{hm \sin \varphi}{\sqrt{1 + (1 - h)^2 + 2(1 - h) \cos \varphi} \sqrt{2(1 + \cos \varphi)}} \right] \frac{dh}{d C} \right\}_{C=C_m} = 0. \quad (2)$$

где C — концентрация; h_m и C_m — значения h и C , соответствующие верхнему пределу измерения. Искомое решение уравнения (2):

$$\varphi_{\text{опт}} = \arccos \frac{\sqrt{32(1 - h_m) h_m^2 + 9 h_m^4 - 4(1 - h_m) - 3 h_m^2}}{4(1 - h_m)}. \quad (3)$$

При $m=1$ чувствительность $\frac{d U_{\text{ВЫХ}}}{d C}$ является монотонно убывающей функцией концентрации. Поэтому отношение γ чувствительности в конце диапазона измерения к чувствительности в начале диапазона измерения может быть использовано в качестве показателя линейности шкалы

$$\gamma = \frac{(2 - h_m) (2 + 2 \cos \varphi_{\text{опт}})^{3/2}}{2 [1 + (1 - h_m)^2 + 2(1 - h_m) \cos \varphi_{\text{опт}}]^{3/2}} \frac{\left(\frac{dh}{d C} \right)_{C = \max C}}{\left(\frac{dh}{d C} \right)_{C = \min C}}$$

Так, например, для $h_m = 0,2$

$$\varphi_{\text{опт}} = \arccos \frac{\sqrt{32(1 - 0,2) 0,2^2 + 9 \cdot 0,2^4 - 4(1 - 0,2) - 3 \cdot 0,2^2}}{4(1 - 0,2)} = \arccos(-0,7191) \approx 136^\circ.$$

Если принять для определенности, что поглощение света происходит по экспоненциальному закону и $\min C=0$, то $h = (1 - e^{-\eta C})$, где η — константа. Отсюда

$$\frac{dh}{dC} = \eta e^{-\eta C} = \eta (1-h); \quad \frac{\left(\frac{dh}{dC}\right)_{C=\max C}}{\left(\frac{dh}{dC}\right)_{C=0}} = 1 - h_m;$$

$$\gamma = \frac{(2-0,2)(2-2 \cdot 0,7191)^{3/2}}{2[1+(1-0,2)^2+2(1-0,2)(-0,7191)^{3/2}]} (1-0,2) = 0,88.$$

Для дифференциальной схемы $\gamma = 1 - h_m = 1 - 0,2 = 0,8$. В рассмотренном примере шкала фазометрической схемы при $\varphi = \varphi_{\text{онт}}$ более линейна, чем шкала дифференциальной схемы, так как в первом случае значение γ меньше отличается от единицы, чем во втором. Можно доказать справедливость этого положения для любого значения h_m и любого реального закона поглощения света газом.

При $m > 1$ минимум чувствительности в принципе может иметь место в любой точке диапазона измерения в зависимости от конкретных значений параметров оптической части прибора. Для $m \neq 1$ чувствительность в произвольно взятой точке диапазона измерения равна

$$\frac{dU_{\text{вых}}}{dC} = k U_0 \beta \frac{m \sin \varphi}{\sqrt{1+m^2+2m \cos \varphi}} \frac{d}{dh} \left(\frac{h}{\sqrt{1+m^2(1-h)^2+2m(1-h) \cos \varphi}} \right) \times$$

$$\times \frac{dh}{dC} = k U_0 \beta \frac{m \sin \varphi}{\sqrt{1+m^2+2m \cos \varphi}} \frac{1+m^2(1-h)+(2-h)m \cos \varphi}{[1+m^2(1-h)^2+2m(1-h) \cos \varphi]^{3/2}} \frac{dh}{dC},$$

где k , как и в (1), — коэффициент пропорциональности (зависит от характеристик фазочувствительного детектора), а значение β определяется из условия

$$\beta = \begin{cases} \sqrt{1+m^2(1-h_m)+2m(1-h_m) \cos \varphi}, & \text{если } \cos \varphi > -m(1-h_m); \\ \sin \varphi, & \text{если } \cos \varphi < -m(1-h_m). \end{cases}$$

Выбор параметров оптической части в общем случае, когда $m \neq 1$, можно осуществить по предварительно вычерченному семейству кривых

$$f(C) = \frac{1}{k U_0} \frac{dU_{\text{вых}}}{dC} = \beta \frac{m \sin \varphi}{\sqrt{1+m^2+2m \cos \varphi}} \times$$

$$\times \frac{1+m^2(1-h)+(2-h)m \cos \varphi}{[1+m^2(1-h)^2+2m(1-h) \cos \varphi]^{3/2}} \frac{dh}{dC}.$$

Каждая кривая будет отражать картину чувствительности в пределах всего диапазона измерения для соответствующих значений φ , m и h_m .

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Дианов-Клоков. Быстродействующий автоматический спектрометр-приставка к спектрографу.— Заводская лаборатория, 1955, № 3.
2. В. И. Дианов-Клоков, А. Д. Стаховский. Двухлучевое регистрирующее устройство.— Приборы и техника эксперимента, 1957, № 4.
3. В. М. Осипов, Ю. В. Попов. Спектроскопический анализатор масла в парафине: УАП-64.— Химия и технология топлива и масла, 1966, № 3.
4. Ю. В. Попов. Некоторые вопросы применения фазометрического метода в фотометрических приборах.— Приборы и системы управления, 1968, № 9.
5. Ю. В. Попов. К теории фазометрического метода в фотометрических приборах.— Автоматика, 1965, № 6.
6. П. И. Дехтяренко. Синхронное детектирование в измерительной технике и автоматике. Киев, «Техника», 1965.

Поступило в редакцию
6 июля 1970 г.