

Ю. М. КОЛПАКОВ, В. В. ПУХОНИН
(Воронеж)

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФАЗОМЕТРИЧЕСКИХ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Фазометрические схемы отношения сравниваемых световых потоков находят применение в широком классе оптических приборов с различными фотометрическими диапазонами измерения. Если в фотометрических спектрофотометрах [1, 2, 3] измерения нередко связаны с большими изменениями коэффициента поглощения, то в анализаторах состава газовых смесей [4, 5, 6, 7] измерения проводятся при очень малых значениях коэффициента поглощения.

Качество работы фазометрического прибора в значительной мере определяется параметрами оптической части фотометра. Вопросу выбора параметров фазометрических приборов посвящен ряд работ. Для частного случая очень малых значений коэффициента поглощения в [8] предложено приближенное аналитическое выражение, характеризующее отношение шум/сигнал на выходе фазометрической системы. Значения параметров оптической части прибора, обеспечивающих минимальное отношение, находятся с помощью численных оценок. В [5, 9] приводятся некоторые зависимости параметров результирующего сигнала (сигнала, определяемого суммарным воздействием на фотоприемник эталонного светового потока и потока, прошедшего через анализируемую среду) от параметров оптической части прибора. Предложенные графики позволяют осуществить для некоторых частных случаев выбор параметров, обеспечивающих линейность градуировочной характеристики.

В настоящей работе на основании анализа выражения, характеризующего выходной сигнал фазометрического прибора, предложены расчетные формулы для определения оптимальных параметров оптической части прибора с любым фотометрическим диапазоном измерения. Расчетные формулы позволяют определить параметры, обеспечивающие минимум отношения шум/сигнал, минимум порога чувствительности, градуировочную характеристику, близкую к линейной.

Предложены также аналитические выражения, позволяющие оценить линейность градуировочной характеристики и погрешность, возникающую при замене полученной градуировочной характеристики линейной.

На векторной диаграмме (рис. 1), характеризующей процессы в измерительной системе фазометрического фотометра, использованы следующие обозначения: $U_{оп}$ — опорный сигнал; U_s — сигнал, обусловленный эталонным световым потоком; U — сигнал, обусловленный световым потоком, прошедшим через исследуемую среду; U_z — результирующий сигнал; U_0 и U_{z0} — значения U и U_z в начале диапазона измерения; φ , ψ и δ — сдвиги фаз.

Постоянная составляющая выходного сигнала фазометрического фотометра может быть представлена выражением [10]

$$U_{вых} = kU_s \sqrt{1 + m^2(1-h)^2 + 2m(1-h)\cos\varphi} \cdot \cos\delta,$$

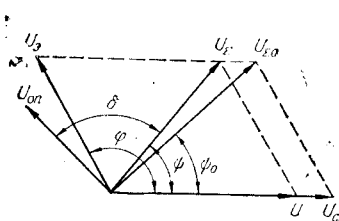


Рис. 1. Векторная диаграмма процессов в системе фазометрического прибора.

где k — коэффициент пропорциональности, $m = U_0/U_s$, $h = \frac{U_0 - U}{U_0}$. По физическому смыслу параметр h является коэффициентом поглощения анализируемой среды.

Отношение m и фаза φ выступают в качестве параметров фазометрического прибора, коэффициент поглощения h — как параметр анализируемой среды.

Начальный сдвиг фаз δ между опорным и результирующим сигналами обычно выбирается равным 90° . При этом условии

$$U_{\text{вых}} = k\omega U_s \sin \Delta\psi, \quad (1)$$

где

$$\omega = \sqrt{1 + m^2(1-h)^2 + 2m(1-h)\cos\varphi};$$

$$\Delta\psi = \psi - \psi_0;$$

$$\psi_0 = \operatorname{arctg} \frac{\sin\varphi}{m + \cos\varphi};$$

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{\sin\varphi}{m(1-h) + \cos\varphi}.$$

Выражения $\Delta\psi$ и $\sin \Delta\psi$ могут быть преобразованы к виду

$$\Delta\psi = \operatorname{arctg} \frac{hm \sin\varphi}{m(m+2\cos\varphi) - h(m+\cos\varphi)m+1}; \quad (2)$$

$$\sin \Delta\psi = \frac{hm \sin\varphi}{\omega Z} \quad (3)$$

(здесь $Z = \sqrt{1 + m^2 + 2m \cos\varphi}$), что значительно облегчает анализ (1).

Чтобы выходная величина $U_{\text{вых}}$ определялась только коэффициентом поглощения h , амплитуда входного сигнала U_s фазового детектора должна быть стабилизирована. Если U_s стабилизирована при своем наименьшем значении $U_{s\text{min}}$, которое в реальных измерительных системах достигается в конце диапазона измерения ($h = h_{\text{max}}$), для выходного сигнала фазометрического прибора можно записать

$$U_{\text{вых}} = k\alpha U_s \sin \Delta\psi,$$

где

$$\omega = \sqrt{1 + m^2(1-h)^2 + 2m(1-h)\cos\varphi};$$

Рассмотрим, при каких значениях m и φ достигается минимум отношения шум/сигнал.

Поскольку эффект воздействия собственных шумов системы на выходной сигнал можно считать независимым от параметров m и φ , а $U_{s\text{min}}$ является величиной постоянной, для достижения минимума отношения шум/сигнал достаточно обеспечить максимум разности фаз $\Delta\psi$ при заданном значении h_{max} .

Исследование (2) показывает, что максимум $\Delta\psi$ достигается при

$$m_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{1}{1 - h_{\text{max}}}}, \quad (4)$$

при любых значениях $\cos\varphi$ (рис. 2, а) и при

$$\varphi_{\text{опт}} = \arccos \frac{(h_{\text{max}} - 2)m}{m^2 + 1 - m^2 h_{\text{max}}}. \quad (5)$$

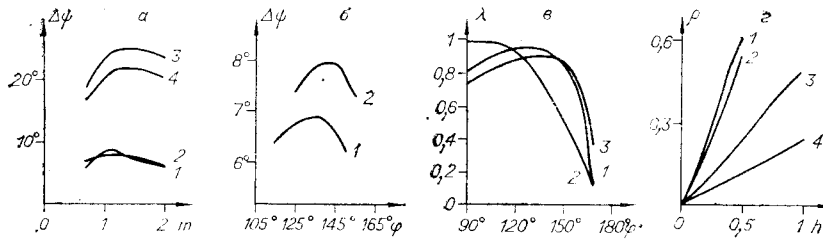


Рис. 2. Основные соотношения между параметрами фазометрических приборов:

a — зависимость $\Delta\psi$ от m при 1) $h_{\max} = 0,2$; $\varphi_{1 \text{ опт}} = 128^\circ$ (при $m=1$); 2) $h_{\max} = 0,2$;

$\varphi_{1 \text{ опт}} = 102^\circ$ (при $m = \frac{1}{3}$); 3) $h_{\max} = 0,5$; $\varphi_{1 \text{ опт}} = 105^\circ$ (при $m_{\text{опт}} = 1,41$);

4) $h_{\max} = 0,5$; $\varphi_{1 \text{ опт}} = 97^\circ$ (при $m = 1$);

б — зависимость $\Delta\psi$ от φ при 1) $h_{\max} = 0,2$; $m = 0,5$ ($\varphi_{1 \text{ опт}} = 138^\circ$); 2) $h_{\max} = 0,2$; $m = 2$ ($\varphi_{1 \text{ опт}} = 148^\circ$);

в — зависимость λ от φ при $h_{\max} = 0,2$ и 1) $m = 1$ ($\varphi_{2 \text{ опт}} = 128^\circ$); 2) $m = \frac{1}{3}$ ($\varphi_{2 \text{ опт}} = 102^\circ$); 3) $m = 1,25$ ($\varphi_{2 \text{ опт}} = 135^\circ$);

з — зависимость $P = \frac{U_{\text{вых}}}{RU_\varnothing}$ при 1) $m = 1$; $h_{\max} = 1$; $\varphi_{3 \text{ опт}} = 102^\circ$; $Q = 1$; 2) $m = \frac{1}{3}$;

$h_{\max} = 1$; $\varphi_{3 \text{ опт}} = 102^\circ$; $Q = 1$; 3) $m_{\text{опт}} = 1,41$; $h_{\max} = 0,5$; $\varphi_{2 \text{ опт}} = 105^\circ$; $Q = 1,8$; 4) $m = 1$; $h_{\max} = 0,5$; $\varphi_{2 \text{ опт}} = 97^\circ$; $Q = 1,4$.

Решение неравенства $|\cos \varphi_{1 \text{ опт}}| < 1$ позволяет определить области значений m :

$$m > \frac{1}{1 - h_{\max}},$$

$$m < 1,$$

при которых в интервале $0^\circ \div 180^\circ$ изменений φ выполняется (5) (см. рис. 2, б).

Можно показать, что при значениях m , ограниченных интервалом

$$1 \leq m \leq \frac{1}{1 - h_{\max}},$$

$\Delta\psi$ имеет максимальное значение при $\varphi = 180^\circ$, что соответствует случаю не фазометрической, а дифференциальной измерительной схемы.

Одним из критериев выбора параметра φ может служить условие достижения минимума порога чувствительности в конце диапазона измерения ($\varphi = \varphi_{2 \text{ опт}}$). Можно показать, что при $m \geq 1$ и $\varphi = \varphi_{2 \text{ опт}}$ наименьшая чувствительность соответствует верхнему пределу измерения.

Если учесть, что система АРУ воздействует в равной степени на шум и амплитуду результирующего сигнала U_x , минимум порога чувствительности определится из условия достижения максимума знаменателя отношения шум/ $R\lambda U_\varnothing$,

где

$$\lambda = \omega \frac{d}{dh} (\sin \Delta\psi).$$

Исходным выражением для определения $\varphi_{2 \text{ опт}}$ служит уравнение

$$\left[\frac{d(R\lambda U_\varnothing)}{dh} \right]_{h=h_{\max}} = \frac{d}{dh} \left[R\omega U_\varnothing \frac{d}{dh} (\sin \Delta\psi) \right]_{h=h_{\max}} = 0. \quad (6)$$

Искомое решение (6) (см. рис. 2, в):

$$\cos \varphi_{2 \text{ опт}} = - \frac{3m^2 + 1 + h^2 m^2 - 4hm^2}{4m} + \frac{\sqrt{m^4 (1 - 4h)^2 + (m^2 h^2 + 1)^2 - 2m^4 (1 + 4h) h^2 - 2m^2 (1 - 4h)}}{4m}. \quad (7)$$

Важной характеристикой аналитических приборов является линейность градуировочной характеристики. В качестве показателя линейности можно использовать отношение Q -чувствительности в конце диапазона измерения к чувствительности в начале диапазона измерения:

$$Q = \frac{\left(\frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dh}\right)_{h=h_{\text{max}}}}{\left(\frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dh}\right)_{h=0}} = \frac{Z[m^2(1-h_{\text{max}}) + 1 + m(2-h_{\text{max}})\cos\varphi]}{\alpha^3}. \quad (8)$$

При заданном значении m и $Q=1$ (8) легко преобразуется к кубическому уравнению, решением которого является $\varphi=\varphi_{\text{опт}}$, обеспечивающее градуировочную характеристику прибора, близкую к линейной.

Например, при $h_{\text{max}}=1$; $m=1$ и $Q=1$ оптимальное значение $\varphi_{\text{опт}}=102^\circ$. Для сравнения можно указать, что в [4] для достижения линейности градуировочной характеристики предложен угол $\varphi=105^\circ$, значение которого получено экспериментально.

При указанных выше значениях параметров фазометрического прибора градуировочная характеристика имеет S-образную форму (см. рис. 2, *г*), однако с хорошей точностью может быть заменена линейной:

$$U_{\text{ВЫХ}}^0 = nh,$$

$$n = \frac{(U_{\text{ВЫХ}})_{h=h_{\text{max}}}}{h_{\text{max}}} = \frac{kU_0 m \sin\varphi}{Z}.$$

При линейзации градуировочной характеристики возникает погрешность. Ее значение, нормированное к диапазону, определяется выражением

$$\gamma = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{(U_{\text{ВЫХ}})_{h=h_{\text{max}}}} = \alpha \frac{h}{h_{\text{max}}} \left[\frac{1}{\omega} - \frac{1}{\alpha} \right].$$

Здесь $\Delta U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ}} - U_{\text{ВЫХ}}^0$.

Можно показать, построив график $\gamma=\gamma(h)$, что во всем интервале изменений $h\gamma$ имеет два экстремума. Например, при $h_{\text{max}}=0,5$; $m=1$ и $\varphi_{\text{опт}}=127^\circ$ наибольшие значения погрешности γ соответствуют точкам $h_1=0,1$ и $h_2=0,4$. Причем в первом случае $\gamma=+2,2\%$, во втором случае $\gamma=-1,1\%$. При $h_{\text{max}}=1$; $m=1$ и $\varphi_{\text{опт}}=102^\circ$ максимальная погрешность ($h_1=0,25$) не превышает $+4\%$.

Можно также показать (см. рис. 2, *г*), что с увеличением m при $\varphi=\varphi_{\text{опт}}$ нелинейность градуировочной характеристики увеличивается. Например, при $h_{\text{max}}=0,5$; $m=1$; $\varphi_{\text{опт}}=97^\circ$ параметр $Q=1,4$. При $m_{\text{опт}}=1,41$; $\varphi_{\text{опт}}=105^\circ$ параметр $Q=1,8$. Для $m=1/3$ и $\varphi_{\text{опт}}=\varphi_{\text{опт}}=102^\circ$ достигается идеальная линейность градуировочной характеристики при изменении h от 0 до 1, что особенно важно при спектрофотометрических измерениях.

Соотношения (4), (5), (7) и (8) при известных значениях коэффициента поглощения анализируемого вещества, определяемого обычно из опыта, позволяют разработчику вычислить оптимальные параметры фазометрического прибора.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Дианов - Клоков. Быстродействующий автоматический спектрометр — приставка к спектрографу. — «Заводская лаборатория, 1955, № 3.
2. Прибор для сравнения двух потоков излучения. Патент Англии, 1958, № 796657, класс 40(3) А5 (Д1 : Д2 : М1 : М2 : Р1В : Р2В).

3. Усовершенствованный спектрометр. Патент Англии, 1961, № 868554, класс 40(3) А 5 (D1 : M2 : P1B : P2B).
4. В. М. Осипов, Ю. В. Попов. Спектроскопический анализатор масла в парафине УАП-64.— Химия и технология топлива и масла, 1966, № 3.
5. А. А. Тудоровский, Ю. В. Попов, В. М. Осипов. Фазометрический метод в двухлучевом ультрафиолетовом анализаторе для нефтепереработки.— «ИВУЗ. Сер. приборостроение, 1966, т. 9, № 2.
6. Ю. В. Попов. Некоторые вопросы применения фазометрического метода в фотометрических приборах.— Приборы и системы управления, 1968, № 9.
7. И. Т. Лосицкий, А. Г. Меламед, В. А. Рылов. Способ анализа газов и жидкостей, 1969. Авторское свидетельство № 243952, класс 42е, 4/13.
8. И. В. Корблев. Об оптимизации параметров фазового абсорбциометра.— Журнал прикладной спектроскопии, 1972, т. 16, № 6.
9. Ю. В. Попов. К теории фазометрического метода в фотометрических приборах.— Автометрия, 1965, № 6.
10. Ю. М. Колпаков, Ю. Я. Медведев. О минимуме порога чувствительности оптических газоанализаторов с фазометрической схемой.— Автометрия, 1971, № 5.

Поступила в редакцию 16 августа 1973 г.

УДК 681.325.36

Г. В. ЕВЗЛИНА ; Г. С. ТЕР-ИСРАЕЛОВ, А. А. ТЕР-ХАЧАТУРОВ

(Сумгаит)

ДАТЧИК ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ РАВНОВЕРЯТНЫХ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ

При аналого-цифровом моделировании различных процессов, проектировании приборов для статистического анализа, исследовании психофизиологических реакций человека возникает необходимость в простых и надежных датчиках периодической последовательности равновероятных величин (в аналоговой или цифровой форме) с непрерывным контролем их статистических характеристик.

В настоящей статье приводится описание принципа действия такого датчика, построенного с использованием простейшего потока импульсов [1], и производится аналитическое исследование статистической зависимости получаемых случайных величин.

В [2, 3] описан способ получения равновероятных временных интервалов путем наложения регулярного потока импульсов на пуассоновский. Равновероятными являются интервалы $\dots, \tau_m, \dots, \tau_{m+N}, \dots$ между импульсами двух потоков (рис. 1).

В датчике, разработанном авторами настоящей статьи, исключен основной недостаток этого способа — аperiodичность выдачи равновероятных временных интервалов.

Датчик (рис. 2) содержит: генератор тактовой частоты 1, работающий в старт-стопном режиме, генератор моментов опроса 2, генера-

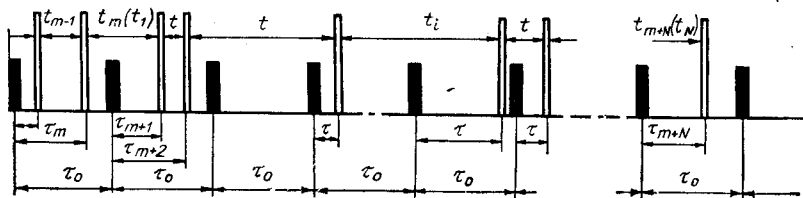


Рис. 1.