

УДК 621.391

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В АБСОРБЦИОННОМ ГАЗОАНАЛИЗАТОРЕ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ МАЛЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ

С.В. Суворов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

e-mail: ssv-gl@mail.ru

Рассмотрены особенности обработки сигналов при измерении малых концентраций, возникающие в абсорбционном газоанализаторе, выделяющем рабочие участки спектра с помощью интерференционных фильтров. Для минимизации погрешности измерения необходимо с достаточной точностью определить отношение малого изменения разности напряжений к большому значению опорного напряжения или отношение двух величин, близкое к единице. В случае детерминированных сигналов преимущество имеет дифференциальный метод измерений. Однако практическая реализация таких измерений при малых концентрациях наталкивается на затруднения, которые необходимо учитывать при проектировании конструкции и разработке алгоритмов обработки сигналов абсорбционного газоанализатора, использующего интерференционные фильтры. Показана необходимость вероятностного подхода в связи с возникающими при измерении малых концентраций сигналами в виде нецентрированных случайных величин. В целях получения достоверного результата условия измерения формализованы для дальнейшего исследования возникающих случайных и систематических погрешностей. Сформулированы необходимые задачи для алгоритма обработки сигналов газоанализатора.

Ключевые слова: абсорбционный газоанализ, сигнал, особенности.

FEATURES OF SIGNAL PROCESSING IN THE ABSORPTION GAS ANALYZER WHEN MEASURING LOW CONCENTRATIONS

S.V. Suvorov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

e-mail: ssv-gl@mail.ru

For measuring low concentrations of vapors and gases the author examines features of signal processing occurring in absorption gas analyzer, which fixes the test region of the spectrum using interference filters. In order to minimize measurement errors with reasonable accuracy it is necessary to determine the ratio of a small change in the voltage difference to the larger value of the reference voltage (corresponding ratio for the two values close to unity). Differential method of measurement has the advantage in the case of deterministic signals. However at low concentrations practical implementation of such measurements comes up against difficulties, that must be considered at structural design and algorithms development for signal processing of absorption analyzer using interference filters. The necessity of a probabilistic approach is shown in relation to emerging signals in the form of acentric random variables when measuring low concentrations. For the purpose of obtaining reliable results measurement conditions have been formalized for further research of emerging random error and systematic inaccuracy. Required problems are formulated for signal processing algorithm of gas analyzer.

Keywords: absorbing gas analysis, signal, peculiarities.

Введение. Известно широкое применение абсорбционных газоанализаторов в промышленных и научных целях. В основе этого применения лежит свойство избирательного поглощения энергии электромагнитного излучения анализируемой газовой средой. Такое свойство носит ярко выраженный селективный характер, обусловленный наличием отдельных спектральных линий и полос поглощения, положение которых на спектральной шкале является индивидуальным для каждого газа. С увеличением длины волны излучения ширина линий и полос поглощения возрастает.

По характеру выбора рабочего спектрального участка абсорбционные газоанализаторы подразделяются на дисперсионные, в которых используются диспергирующие элементы (призмы, дифракционные решетки), и бездисперсионные. При этом в том и другом случае чаще всего применяются широкоспектральные (немонохроматические) источники излучения. Дисперсионные приборы конструктивно достаточно сложны и предназначены для исследования многокомпонентных смесей и тонкого спектрального анализа в аналитических измерениях.

К наиболее распространенным бездисперсионным приборам следует отнести оптико-акустические газоанализаторы (ОАГ), принцип действия которых основан на селективном возбуждении акустических колебаний в специально подобранной газовой смеси приемника. Вместе с тем, использование такого принципа газоанализа в практических условиях имеет ограничения, главным образом вследствие невозможности оперативной перенастройки рабочего реагента на различные участки спектра.

В подобных случаях интерес представляют бездисперсионные газоанализаторы, в которых выбор рабочего спектрального диапазона происходит за счет селективных элементов оптической схемы: приемников; линз; фильтров; излучателей. Целесообразно применять абсорбционные бездисперсионные оптические газоанализаторы, в которых выбор рабочего спектрального участка осуществляется с помощью оптических фильтров. Оптическая схема и конструкция таких газоанализаторов наиболее простая, а стоимость наименьшая. В то же время по сравнению, например, с ОАГ они могут быть более универсальными, используя для анализа сразу несколько спектральных рабочих участков, выделяемых сменными светофильтрами.

Измерение малых концентраций компонентов газовой среды абсорбционным методом требует большого усиления электронного тракта системы, что приводит к возрастанию шумов и, как следствие, к случайному характеру не только информативного, но и опорного сигнала. В этом случае алгоритм обработки сигналов должен обеспечивать различение двух случайных сигналов с известной степенью достоверности.

Рассмотрим особенности работы прибора абсорбционного типа инфракрасного (ИК) диапазона, выделяющего рабочие участки на шкале длин волн с помощью интерференционных фильтров и предназначенного для измерения малых концентраций отдельных компонентов анализируемой среды. Далее такой прибор будем называть газоанализатором.

Формирование сигналов и их обработка. При измерении малых концентраций монохроматического излучения справедливо выражение [1, 2]

$$c = \frac{I_0 - I}{I_0 \chi L}, \quad (1)$$

где c — концентрация определяемого компонента в анализируемой среде; I_0 — интенсивность излучения на входе в анализируемую среду; I — интенсивность излучения, ослабленного за счет поглощения в анализируемой среде; χ — удельный коэффициент поглощения излучения анализируемым компонентом среды на длине волны монохроматического излучения; L — длина пути, преодолеваемого излучением в анализируемой среде.

Для некогерентного излучения приведенная зависимость существенно усложняется, так как интенсивность излучения и коэффициент поглощения неравномерны по спектру.

Выделение рабочего спектрального участка с помощью интерференционного фильтра приводит к расширению спектрального диапазона, в котором формируется излучение интенсивностью I_0 , поскольку ширина полосы пропускания полосового интерференционного фильтра технологически заметно шире линии или полосы поглощения исследуемого компонента [1]. Это вызывает уменьшение разности в числителе выражения (1) и снижение чувствительности прибора.

В газоанализаторе потоки излучения с интенсивностями I_0 и I должны пропорционально преобразовываться в напряжения U_0 и U , а концентрация исследуемого компонента определяться по выражению, вытекающему из формулы (1):

$$c = \frac{U_0 - U}{U_0} k_n = (1 - r) k_n, \quad (2)$$

где k_n — нормирующий коэффициент, зависящий от конструкции прибора и определяемый при калибровке. Согласно выражению (2), для минимизации погрешности измерения искомой концентрации необходимо с достаточной точностью измерять величину $\Delta U/U_0$ — отношение малого изменения разности напряжений к большому значению напряжения или измерять отношение r двух величин U и U_0 , близкое к единице.

Сравним два варианта определения величины r по точности получаемого значения. В первом варианте (рис. 1, а) напряжения U и

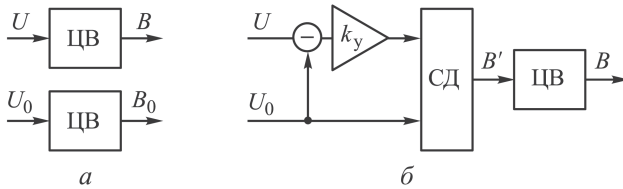


Рис. 1. Варианты схем определения величины r

U_0 определяются напрямую с помощью цифрового преобразователя (вольтметра ЦВ), имеющего класс точности g/f . При этом величина r находится делением выходных значений преобразователя: $r = B/B_0$. Во втором дифференциальном варианте (рис. 1, б) разность напряжений U_0 и U усиливается (коэффициент усиления k_y), делится в схеме деления (СД) на напряжение U_0 и поступает в цифровой преобразователь ЦВ, дающий показание B . Тогда величина r вычисляется как $r = (k_y - B) / k_y$ [1].

Относительная погрешность преобразователя класса точности g/f равна [3]

$$\delta = g + f \left(\frac{U_k}{U} - 1 \right), \quad (3)$$

где U — измеренное значение; U_k — предельное (конечное) значение выбранного диапазона измерения.

Примем для определенности в двух вариантах $U_0 = 5 \text{ В}$, $U = 4,95 \text{ В}$ и, следовательно, истинное отношение между ними $r_{\text{и}} = 4,95/5 = 0,99$.

В первом варианте $r = B/B_0$. Определим погрешности. Абсолютная погрешность составляет

$$\Delta r = \frac{\partial r}{\partial B} \Delta B + \frac{\partial r}{\partial B_0} \Delta B_0 = \frac{\Delta B}{B_0} - \frac{B \Delta B_0}{B_0^2} = \frac{1}{B_0} (\Delta B - r \Delta B_0),$$

относительная погрешность —

$$\delta r = \frac{\Delta r}{r} = \frac{B_0^{-1} (\Delta B - r \Delta B_0)}{B B_0^{-1}} = \frac{\Delta B - r \Delta B_0}{B}.$$

Пусть преобразователь ЦВ имеет класс точности 1,0/0,5. Тогда в соответствии с (3) на пределе измерений 10 В получим $\delta_{U_0} = 1,0 + 0,5 (10/5 - 1) = 1,5 \%$. Аналогично, $\delta_U \cong 1,5 \%$. Таким образом, результаты, выдаваемые ЦВ в первом варианте, находятся в пределах: $B_0 = 5 \text{ В} \pm 1,5 \%$; $B = 4,95 \text{ В} \pm 1,5 \%$. В этом случае $\Delta B \cong \Delta B_0 = 5 \cdot 0,015 = 0,075 \text{ В}$, а максимально возможная относительная погрешность определения величины r равна $\delta r = \frac{\Delta B + r \Delta B_0}{B} = \frac{0,075 + 0,99 \cdot 0,075}{4,95} \cong 0,03 (3 \%)$.

Согласно (2), во втором варианте $B = (k_y (U_0 - U) / U_0) = k_y (1 - r)$. Полагаем, что класс точности преобразователя ЦВ такой же, как и

в первом варианте, а коэффициент усиления $k_y = 10$ изменяется не более чем на 5 %. Тогда номинальный сигнал на выходе СД составляет $B' = \frac{k_y(U_0 - U)}{U_0} = \frac{10 \cdot (5 - 4,95)}{5} = 0,1$. При таком входном сигнале преобразователь ЦВ может работать на пределе измерения $U_k = 1$ В. В этом случае $\delta_B = 1,0 + 0,5 \cdot \left(\frac{1,0}{0,1} - 1\right) = 5,5\%$, а максимально возможная относительная погрешность определения величины r , как показано в работах [1, 4], равна $\delta r = \frac{1-r}{r} (\delta k_y - \delta_B) = \frac{1-0,99}{0,99} \times (5 + 5,5) \cong 0,11\%$.

Приведенный расчет показывает, что даже при не самых выгодных с позиции точности параметрах k_y и U_k второй вариант дает существенно более точный результат. Это справедливо при детерминированном характере обрабатываемых сигналов.

Однако практическая реализация указанных вариантов наталкивается на следующие затруднения.

1. При использовании ИК-диапазона с длинами волн $\lambda > 2 \dots 3$ мкм единственным неохлаждаемым приемником излучения может быть пироприемник, имеющий приемлемый порог чувствительности. Однако отклик пироприемника чувствителен к скорости изменения детектируемого потока [5–7]. Нестабильность этой скорости приводит к флуктуациям напряжений U и U_0 .

2. Отклик пироприемника составляет единицы милливольт. Для дальнейшей обработки отклика его необходимо значительно усиливать, что приводит к увеличению электронных шумов и, как следствие, к нестабильности напряжений U и U_0 .

3. Напряжения U и U_0 образуются как результат усиленного отклика приемника излучения, воспринимающего потоки излучения: ослабленный поглощением и прошедший без ослабления базовое расстояние L . Чем меньше ширина полосы пропускания интерференционного фильтра, тем чувствительней прибор. Узкая полоса пропускания фильтра приводит к снижению потока, попадающего на приемник с ограниченным порогом чувствительности. Уровень потока, прошедшего через фильтр, можно поднять за счет повышения температуры излучателя, что приводит к увеличению энергопотребления. Это особенно нежелательно для портативных приборов. В результате разность потоков $I_0 - I$ оказывается близка к порогу чувствительности приемника. Эта разность тем меньше, чем меньшие концентрации должен измерять прибор (1), имеющий к тому же в портативном варианте малую базу L . Это приводит к повышению флуктуаций напряжений U и U_0 , особенно с уменьшением измеряемых концентраций.

4. Источник излучения, за счет которого формируются потоки с интенсивностями I и I_0 , также подвержен нестабильности, приводящей к флуктуациям напряжений U и U_0 .

5. В соответствии с выражением (2) при нахождении искомой концентрации необходимо выполнять операцию деления одной случайной величины на другую, что может вызвать существенные деформации начальных законов распределения.

Перечисленные затруднения требуется учитывать при проектировании конструкции и разработке алгоритмов обработки сигналов абсорбционного газоанализатора, использующего интерференционные фильтры. Напряжения U и U_0 при измерении малых концентраций следует рассматривать как случайные величины.

Структурная схема прибора, учитывающая указанные затруднения, приведена на рис. 2.

В рабочем режиме при вращающемся модуляционном диске (МД) и нагретом излучателе на приемнике излучения (ПИ) формируется последовательность чередующихся импульсов, вызванная прохождением через интерференционные фильтры потоков излучения от излучателя. Сформированный после усилителя-формирователя (УФ) сигнал подается на пиковый детектор (ПД) для выделения максимума. Выделенный максимум каждого импульса заносится в память микроконтроллера (МК). После каждого выделения максимума ПД обнуляется. Микроконтроллер управляет схемой стабилизации (СС), задавая режим вращения электродвигателя (ЭД). Кроме того, МК управляет режимом работы излучателя (на схеме не показано) и формирует результирующий сигнал для индицирующего устройства (ИН). Таким образом, импульсы напряжений U и U_0 , вызванные воздействиями потоков излучения с интенсивностями I и I_0 и проходящими соответственно через интерференционные фильтры ИФ, ИФ₀, поступают на запись в память МК через одну и ту же цепочку: ПИ–УФ–ПД. Это позволяет избежать отклонений сигналов, вызванных разбросом параметров цепочек, в случае раздельного формирования сигналов.

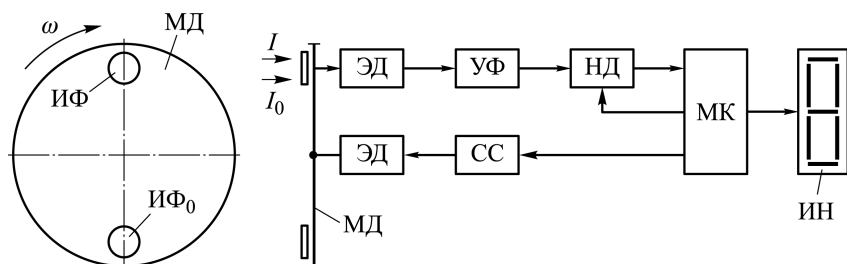


Рис. 2. Структурная схема прибора:

ω — угловая скорость вращения модуляционного диска; МД — модуляционный диск; ИФ — интерференционный фильтр; УФ — усилитель-формирователь; ПД — пиковый детектор; ЭД — электродвигатель; СС — схема стабилизации угловой скорости вращения МД; МК — микроконтроллер; ИН — индицирующее устройство

Формализуем задачу применительно к представленной на рис. 2 структурной схеме. В МК можно накапливать выборки напряжений U и U_0 , которые поступают с частотой ω вращения МД. Представим выборку последовательных значений напряжений U в виде случайной величины $X = (x_1, \dots, x_n)$, а выборку последовательных значений напряжений U_0 — в виде $Y = (y_1, \dots, y_m)$. Будем полагать, что эти выборки нормально распределены и независимы, с независимыми выборочными значениями в них. При этом выражение (2) приобретает вид

$$c = \frac{Y - X}{Y} k_n. \quad (4)$$

Каждое текущее значение x и y (элементы выборок) можно представить как

$$x = a + \xi_x - \eta;$$

$$y = b + \xi_y,$$

где a — постоянная составляющая, обусловленная световым потоком, проходящим через ИФ (см. рис. 2); ξ_x — случайная центрированная величина (помеха), определяемая многими факторами случайного характера (электронными шумами, колебаниями скорости вращения МД, турбулентностью анализируемой газовой среды, нестабильностью источника излучения); η — информативный параметр, обусловленный присутствием в анализируемой среде поглощающего компонента (равен нулю в его отсутствие и возрастает с увеличением концентрации исследуемого вещества); b — постоянная составляющая, характеризующая световым потоком, проходящим через ИФ₀; ξ_y — случайная центрированная величина (помеха), обусловленная теми же факторами, что и величина ξ_x .

Разность величин y и x имеет вид $y - x = (b - a) + (\xi_y - \xi_x) + \eta$. Каждая постоянная составляющая a и b определяется несколькими факторами: полосой пропускания соответствующего ИФ; положением этой полосы на шкале длин волн; температурой излучателя; чувствительностью ПИ; коэффициентом усиления УФ. Разность $b - a$ можно сделать нулевой подбором полосы пропускания фильтра ИФ₀ или введением корректирующей константы непосредственно в разность $y - x$. Поскольку выборочные значения x и y берутся в разные моменты времени, $\xi_x \neq \xi_y$. Тогда $(y - x)|_{a=b} = \eta + \xi_\Sigma$, где ξ_Σ — случайная величина (помеха), обусловленная суммарным действием случайных факторов при получении выборочных значений x_i и y_i .

Выражению (4) соответствует текущее выборочное значение

$$\frac{y - x}{y} \Big|_{a=b} = \frac{\eta + \xi_\Sigma}{b + \xi_y}. \quad (5)$$

При измерении малых концентраций η — малая величина, соизмеримая с помехой ξ_{Σ} , и использование выражения (5) неправомерно, так как измерение по одной паре выборочных значений x_i и y_i в условиях помехи, соизмеримой с полезным сигналом, будет давать непредсказуемо ложный результат.

При разработке алгоритма обработки сигналов в МК возникает пять взаимосвязанных задач, без решения которых невозможно утверждать о качестве измерений.

1. При малых концентрациях исследуемого компонента средние значения напряжений U и U_0 и соответствующих им случайных величин X и Y будут близки. В выражении (4) предполагается, что при ненулевой измеряемой концентрации $\bar{x} < \bar{y}$ возникает вопрос о достоверности этого предположения.

2. Очевидно, что для получения приемлемой точности результата необходимо провести значительное число отсчетов. Каким образом определять размер необходимой выборки для величин X и Y ?

3. В отсутствие исследуемого компонента результат измерения должен равняться нулю. Как это обеспечить в условиях измерения случайных, неоднозначных в каждом отсчете величин?

4. Какова будет погрешность измерения и возможна ли ее априорная оценка на основании измеряемых параметров?

5. Как минимизировать систематические погрешности газоанализатора, обусловленные температурной зависимостью потоков излучения, участвующих в формировании сигналов U и U_0 ?

Заключение. При наличии детерминированных сигналов дифференциальная обработка позволяет на порядок повысить точность измерения газоанализатора.

При низкой оптической плотности анализируемой среды, когда малы длина пути, преодолеваемого излучением в анализируемой среде, и концентрация исследуемого вещества, становится малой и разность сравниваемых лучистых потоков, определяющая результат измерения. Это требует увеличения усиления электронного тракта и приводит к тому, что обрабатываемые сигналы становятся нецентрированными случайными величинами. При выделении рабочих участков спектра с помощью ИФ, имеющих рабочую ширину, превышающую полосу поглощения исследуемого компонента, необходимость в значительном усилении сигналов возрастает.

В этих условиях алгоритм обработки сигналов должен носить вероятностный характер и решать перечисленные выше задачи. Исследованию случайных и систематических погрешностей абсорбционного газоанализатора, выделяющего рабочие спектральные диапазоны с помощью ИФ, будут посвящены последующие статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мусьяков М.П., Ванеев Г.Г., Суворов С.В. Новый метод определения ПДК экологически вредных паров и газов в атмосфере // Актуальные проблемы фундаментальных наук: Труды Второй Международной науч.-техн. конф. В 7 т.; под ред. И.Б. Федорова, К.С. Колесникова, А.О. Карпова. Симпозиум “Химия и экология в техносфере”. М., 1994. Т. 4. С. 91–99.
2. Чулановский В.М. Введение в молекулярный спектральный анализ. Л.–М.: Госуд. изд. техн.-теорет. литературы, 1950. 368 с.
3. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 304 с.
4. Жилинскас Р.П. Измерители отношения и их применение в радиоизмерительной технике. М.: Сов. радио, 1975. 132 с.
5. Ишанин Г.Г. Приемники излучения оптических и оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1986. 175 с.
6. Кременчугский Л.С., Ройцина О.В. Пироэлектрические приемники излучения. Киев: Наукова думка, 1979. 381 с.
7. Некоторые особенности пироэлектрических преобразователей на полимерных сегнетоэлектриках / М.П. Мусьяков, Б.И. Шахтарин, Г.Г. Ванеев, С.В. Суворов // Электричество. 1998. № 9. С. 46–51.

REFERENCES

- [1] Mus'yakov M.P., Vaneev G.G., Suvorov S.V. A new method of determining the maximum permissible concentration (MPC) environmentally harmful vapors and gases in the atmosphere. *Tr. Vtoroy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. konf. "Aktual'nye problemy fundamental'nykh nauk". V 7 t. pod red. Fedorova I.B., Kolesnikova K.S., Karpova A.O. T. 4. Simpozium "Khimiya i ekologiya v tekhnosfere"* [Proc. 2nd. Int. Sci.-Tech. Conf. "Actual Problems of Basic Sciences". In 7 vol. Ed. by Fedorov I.B., Kolesnikov K.S., Karpov A.O. Vol. 4. Symposium "Chemistry and ecology in the technosphere"], Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 1994, pp. 91-99 (in Russ.).
- [2] Chulanovskiy V.M. Vvedenie v molekulyarnyy spektral'nyy analiz [Introduction to molecular spectral analysis]. Leningrad–Moscow, Gos. Izd. Tekhn.-Teoret. Literaturny Publ., 1950. 368 p.
- [3] Novitskiy P.V., Zograf I.A. Otsenka pogreshnostey rezul'tatov izmereniy [Error estimation of the measured data]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1991. 304 p.
- [4] Zhilinskas R.P. Izmeriteli otnosheniya i ikh primeneniye v radioizmeritel'noy tekhnike [Quotient meter and their application for radio measuring technique]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1975. 132 p.
- [5] Ishanin G.G. Priemniki izlucheniya opticheskikh i optiko-elektronnykh priborov [Radiation detectors of optical and opto-electronic devices]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1986. 175 p.
- [6] Kremenchugskiy L.S., Roytsina O.V. Piroelektricheskie priemniki izlucheniya [Pyroelectric detectors]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1979. 381 p.
- [7] Mus'yakov M.P., Shakhtarin B.I., Vaneev G.G., Suvorov S.V. Some features of pyroelectric converters based on polymer ferroelectric materials. *Elektrichestvo* [Electrical Technology Russia], 1998, no. 9, pp. 46–51 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 01.04.2014

Суворов Сергей Витальевич — канд. техн. наук, доцент кафедры “Автономные информационные и управляющие системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана, заведующий отделом “Информационные и управляющие системы” НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных работ в области систем ближней локации и теории высшего образования.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Suvorov S.V. — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of “Autonomous Information and Control Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University, head of “Information and Control Systems” department of the Research Institute for Special Mechanical Engineering of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 50 publications in the field of short-range radar systems and theory of higher education.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.