

Коррекция динамических характеристик тепловых газоанализаторов. М и х а л ь ч у к Н. С., П а к А. В., С л е с а р е в И. С. — В кн.: Научное приборостроение. Л., «Наука», 1983, с. 51—57.

На примере термокондуктометрического типа газоанализаторов рассмотрены динамические характеристики теплообмена в измерительных ячейках приборов. Решены нестационарные задачи теплообмена и получено аналитическое выражение переходной характеристики термокондуктометрического газоанализатора. Рассмотрен метод уменьшения динамической погрешности приборов, имеющих переходные характеристики экспоненциального вида, с помощью корректирующих устройств, представляющих усилители с отрицательной обратной связью через низкочастотный RC-фильтр. Представлены варианты корректирующих устройств, в том числе имеющих разные постоянные времени в прямом и обратном направлении изменения измеряемой величины. Данный метод коррекции динамических характеристик применен в различных приборах, разработанных в СКБ аналитического приборостроения НТО АН СССР. Приведены электрическая схема блока коррекции и данные, показывающие эффективность его применения. Лит. — 5. назв., ил. — 4, табл. — 3.

## КОРРЕКЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВЫХ ГАЗОАНАЛИЗАТОРОВ

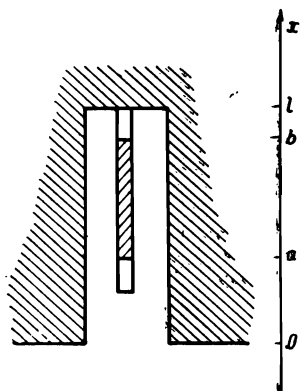
В настоящее время в связи с тенденцией роста автоматизации технологических процессов повышаются требования к измерительным приборам, в том числе и к аналитическим. В частности, это касается их динамических характеристик, от которых зависит качество регулирования хода процессов, охваченных системами автоматического управления. Так, например, если существующие в настоящее время газоанализаторы имеют время установления показаний от нескольких до десятков минут, то сейчас требуются приборы с временем установления показаний порядка единиц секунд. Особенно жесткие требования предъявляются к приборам, предназначенным для обеспечения безопасности некоторых видов производства.

Основную массу существующих газоанализаторов как по общему количеству, так и по номенклатуре составляют тепловые газоанализаторы, к которым относятся термокондуктометрические, термохимические и термомагнитные. Их широкому распространению способствовали присущие этим приборам достоинства, а именно: высокая стабильность, простота, обуславливающая высокую надежность, отсутствие движущихся частей и т. д. [1]. Однако тепловые приборы имеют и некоторые недостатки, одним из которых является большое значение времени запаздывания показаний.

В зависимости от анализируемой смеси и конструктивных особенностей время запаздывания составляет для тепловых газоанализаторов величину от десятков секунд до десятков минут и складывается из времени начала реагирования ( $t_{н.р}$ ) и времени переходного процесса ( $t_{н.п}$ ). Величина  $t_{н.р}$  определяется в основном временем транспортирования пробы от точки забора до измерительной ячейки датчика. Путем помещения датчика в точку, где необходимо контролировать состав, или путем увеличения скорости транспортирования пробы  $t_{н.р}$  может быть уменьшена до 0.5—1.5 с.

Основной составляющей времени запаздывания показаний является время переходного процесса. В тепловых газоанализаторах оно определяется в основном двумя процессами: газообменом в измерительных ячейках датчика и уста-

Рис. 1. Схема конструкции измерительной ячейки датчика термокондуктометрического газоанализатора.



новлением теплового режима чувствительных элементов (ЧЭ). Рассмотрим эти процессы на примере простейшего из тепловых приборов — термокондуктометрического газоанализатора.

Термокондуктометрические газоанализаторы, как правило, имеют диффузионный заход газа в измерительные ячейки, что обуславливается необходимостью исключения влияния изменения расхода анализируемого газа и ориентации датчика в пространстве на показания прибора. На рис. 1 схематично показана конструкция измерительной ячейки с установленным в ней ЧЭ. ЧЭ представляет собой остеклованную в виде стержня спираль из металла с высоким температурным коэффициентом сопротивления, чаще всего платины. На рис. 1 заштрихованная часть стержня показывает место расположения спирали, т. е. активной части ЧЭ. Ячейка, имеющая форму цилиндра, открыта с одного из торцов, через который осуществляется диффузионный газообмен.

Для получения динамических характеристик газообмена в ячейке необходимо решить одномерную задачу диффузии, которая сводится к дифференциальному уравнению [2]

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{1}{D} \frac{\partial C}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

со следующими граничными и начальными условиями:

$$C|_{t=0} = 0, \quad C|_{x=0} = C_0, \quad \frac{\partial C}{\partial x}|_{x=l} = 0.$$

Решением этой задачи является выражение

$$C = C_0 \left\{ 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin\left(\frac{2n+2}{2l} \pi x\right) \exp\left[-\left(\pi \frac{2n+1}{2l}\right)^2 Dt\right] \right\}. \quad (2)$$

Так как выходной сигнал датчика обуславливается средней концентрацией измеряемого компонента вдоль активной части ЧЭ, необходимо произвести усреднение  $C$  по  $x$  от  $a$  до  $b$ . В результате получается следующая формула:

$$C = c_0 \left\{ 1 - \frac{16l}{(b-a)\pi^2} \times \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin\left(\frac{2n+1}{2} \pi \frac{b+a}{2l}\right) \sin\left(\frac{2n+1}{2} \pi \frac{b-a}{2l}\right) \exp\left[-\left(\pi \frac{2n+1}{2l}\right)^2 Dt\right]}{(2n+1)^2} \right\}. \quad (3)$$

Из анализа выражения (3) вытекает, что с достаточной для практических целей точностью можно ограничиться первым членом ряда, т. е. представить переходный процесс диффузии экспоненциальным:

$$C = C_0 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_x}\right) \right] \quad (4)$$

с постоянной времени  $T_x = 4l^2/(\pi^2 D)$ . В табл. 1 приведены расчетные величины постоянной времени газообмена при  $l=25$  мм, что соответствует конструкции современных газоанализаторов, разработанных СКБ аналитического приборостроения АН СССР.

**Т а б л и ц а 1**  
**Значения постоянной времени газообмена для различных газовых смесей**

Газовая смесь	Коэффициент диффузии $D \cdot 10^4, \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ [3]	Постоянная времени, с
Водород—азот	0.689	3.7
Водород—аргон	0.674	3.76
Водород—диоксид углерода	0.661	3.8
Гелий—азот	0.621	4.1
Воздух—метан	0.22	11.5
Диоксид углерода—метан	0.18	14.0
Диоксид углерода—азот	0.144	17.6

Вторая составляющая инерционности термокондуктометрического газоанализатора, связанная с теплообменом чувствительного элемента и анализируемого газа, может быть оценена путем решения задачи теплообмена ЧЭ с газом, сводящейся к следующей краевой задаче [2]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \frac{1}{a} \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0;$$

$$\theta|_{t=0} = \theta_0, \theta|_{x=0} = 0, \theta|_{r=0} \text{ ограничено}; \quad (5)$$

$$\left( \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\alpha}{\lambda} \theta \right) \Big|_{r=R} = 0, \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\alpha}{\lambda} \theta \right) \Big|_{x=l} = 0,$$

где  $a, \alpha, \lambda$  — соответственно коэффициенты температуропроводности, теплоотдачи с поверхности и теплопроводности материала ЧЭ;  $l$  — длина ЧЭ.

Решением данной задачи является выражение

$$\theta = 4\theta_0 \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_1(\gamma_n) J_0\left(\gamma_n \frac{r}{R}\right) (1 - \cos \eta_m) \sin\left(\eta_m \frac{x}{l}\right) \exp\left[-\left(\frac{\gamma_n^2}{R^2} + \frac{\eta_m^2}{l^2}\right) at\right]}{\gamma_n [J_1^2(\gamma_n) + J_0^2(\gamma_n)] (\eta_m - \sin 2\eta_m)}, \quad (6)$$

где  $\gamma_n$  — корни уравнения  $\lambda \gamma J_1(\gamma) = \alpha R J_0(\gamma)$ ;  $\eta_m$  — корни уравнения  $\lambda \eta = -\alpha l \operatorname{tg} \eta$ .

Ограничиваясь только первым членом ряда с наибольшим значением постоянной времени, получим, что величина постоянной времени ЧЭ будет равна

$$T_{\tau} = \frac{1}{a \left( \frac{\gamma_1^2}{R^2} + \frac{\eta_1^2}{l^2} \right)}. \quad (7)$$

**Т а б л и ц а 2**  
**Значения постоянной времени тепловой инерции чувствительного элемента в различных газах**

Газ, окружающий чувствительный элемент	Коэффициент теплопроводности газа, $\frac{\text{Вт}}{\text{К} \cdot \text{м}}$ [3]	Постоянная времени, с
Водород	18.4	0.62
Гелий	15.1	0.71
Метан	3.35	2.8
Азот	2.6	3.7
Диоксид углерода	1.8	5.2
Аргон	1.74	5.2

В табл. 2 приведены значения постоянной времени ЧЭ для различных окружающих его газов. Постоянная времени обратно пропорциональна тепло-

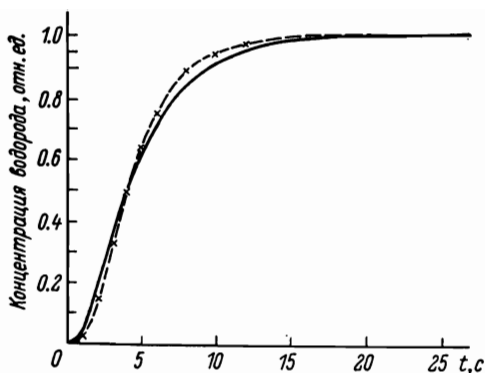


Рис. 2. Экспериментальная (пунктир) и расчетная (сплошная кривая) переходные характеристики термокондуктометрического датчика для измерения концентрации водорода в азоте.

проводности газа и имеет для большинства газов, за исключением водорода и гелия, величину, сравнимую с постоянной времени газообмена.

Ввиду зависимости постоянной времени от теплопроводности, а значит и от состава, переходный процесс не является чисто экспоненциальным, однако при небольших изменениях концентрации может с достаточной точностью считаться таковым и быть представленным выражением, аналогичным (4):

$$\theta = \theta_0 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_r}\right) \right]. \quad (8)$$

Так как остальные процессы преобразования концентрации в электрический сигнал практически безынерционны, переходный процесс показаний термокондуктометрического газоанализатора может быть получен в результате операции свертки и последующего дифференцирования двух слагаемых вида  $[1 - \exp(-\frac{t}{T})]$ , отличающихся значением  $T$ .

В результате получаем следующую формулу, описывающую переходный процесс:

$$U = U_0 \left[ 1 - \frac{T_d}{T_d - T_r} \exp\left(-\frac{t}{T_d}\right) - \frac{T_r}{T_r - T_d} \exp\left(-\frac{t}{T_r}\right) \right]. \quad (9)$$

На рис. 2 приведен экспериментальный и расчетный графики переходного процесса показаний датчика для измерения содержания водорода в азоте. Видно хорошее совпадение полученных результатов.

Существует несколько путей улучшения динамических характеристик тепловых газоанализаторов. Наиболее очевидным является путь уменьшения постоянных времени звеньев преобразования посредством миниатюризации чувствительных элементов. Это позволяет уменьшать обе составляющие инерционности. В настоящее время возможности этого пути практически исчерпаны, так как дальнейшая миниатюризация связана с ухудшением других важнейших характеристик, таких как чувствительность, точность и стабильность.

Вторым путем является коррекция динамических характеристик датчика газоанализатора с использованием специальных устройств, преобразующих его выходной сигнал. В литературе [4, 5] широко описаны корректирующие устройства для приборов, измеряющих различные неэлектрические величины, например температуру.

Как было показано выше, датчик газоанализатора представляет собой два последовательно включенных инерционных звена преобразования информации, т. е. его коэффициент преобразования в операторном виде может быть представлен следующим образом:

$$K(p) = \frac{K_0}{(1 + pT_d)(1 + pT_r)}, \quad (10)$$

где  $K_0$  — статический коэффициент передачи.

Для идеальной коррекции корректирующее устройство должно иметь коэффициент передачи, равный

$$K_{к.г.}(p) = (1 + pT_d)(1 + pT_r), \quad (11)$$

т. е. должно представлять собой два форсирующих звена, включенных последовательно, с постоянными времени, равными постоянным времени  $T_d$  и  $T_r$  датчика.

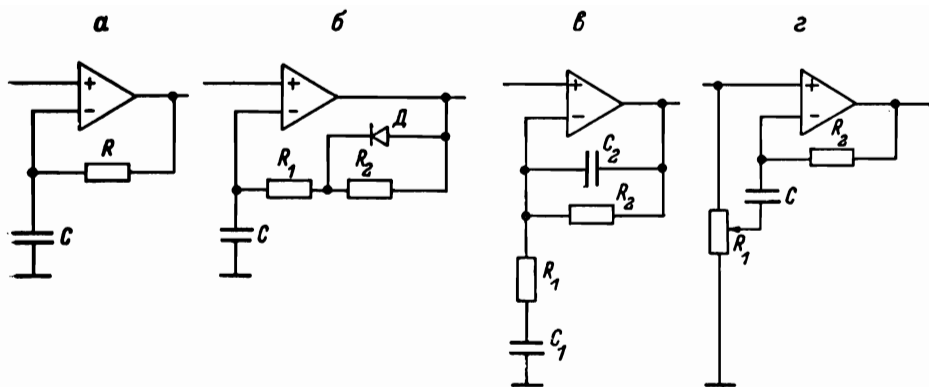


Рис. 3. Схемы (а—г) корректирующих устройств.

Известно, что идеальные форсирующие звенья не реализуемы, однако с достаточной степенью приближения в качестве таковых могут применяться операционные усилители, охваченные отрицательной обратной связью через однозвенный  $RC$ -фильтр низких частот. Схема простейшего корректирующего устройства на операционном усилителе приведена на рис. 3, а. Включая последовательно два таких устройства на выходе датчика газоанализатора с постоянными времени  $T=RC$ , равными соответственно  $T_d$  и  $T_r$ , теоретически возможно уменьшить инерционность газоанализатора до величин, определяемых вторыми членами рядов (3) и (6).

Однако ввиду специфических особенностей тепловых газоанализаторов применение данного корректирующего устройства затрудняется. Во-первых, как видно из данных табл. 2, постоянная времени  $T_r$  ЧЭ зависит от состава. Во-вторых, при определении диффузионной составляющей не учитывается процесс термодиффузии, который приводит к различию  $T_d$  в прямом и обратном направлении. Например, при измерении содержания водорода в азоте оба этих обстоятельства приводят к тому, что эффективная постоянная времени при увеличении концентрации водорода меньше, чем при уменьшении концентрации. При применении корректирующего устройства по рис. 3, а коррекция достижима только для одного из направлений изменения измеряемой величины.

Для обеспечения приемлемого качества коррекции в обоих направлениях может быть использовано корректирующее устройство по рис. 3, б. В устройстве резистор в цепи обратной связи разбит на два, один из которых шунтирован полупроводниковым диодом. В результате этого постоянная времени корректирующего устройства также будет зависеть от направления изменения измеряемой величины. Подбором резисторов  $R_1$  и  $R_2$  можно добиться, чтобы постоянные времени корректирующего устройства и датчика совпадали для обоих направлений изменения концентрации.

Существенным недостатком корректирующих устройств по рис. 3, а, б является их большой коэффициент усиления для высокочастотных шумов и импульсных помех. Для подавления высокочастотных помех рекомендуется включение дополнительного конденсатора параллельно резистору обратной связи или резистора последовательно с конденсатором  $RC$ -фильтра, или того и другого, как показано на рис. 3, в. Коэффициент передачи этого устройства равен

$$K(p) = \frac{1 + pT_1}{(1 + pT_2)(1 + pT_3)}, \quad (12)$$

где  $T_1 = R_2 C_1$ ,  $T_2 = R_2 C_2$ ,  $T_3 = R_1 C_1$ .

Постоянные времени  $T_2$  и  $T_3$  выбирают порядка 0.05—0.5 с, а постоянную времени  $T_1$  настраивают равной одной из постоянных времени датчика. Коэффициент передачи такого устройства при увеличении частоты растет, начиная с частоты  $\omega_1 = 1/T_1$ , до частоты  $\omega_2$ , равной меньшему из значений  $1/T_2$ ,  $1/T_3$ ,

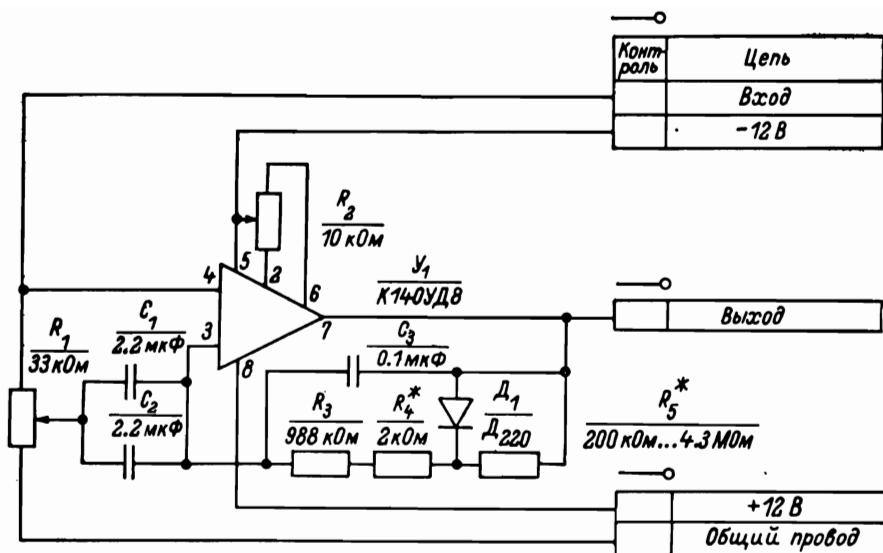


Рис. 4. Схема блока коррекции газоанализатора ТП5502.

затем остается постоянным и, начиная с  $\omega_3$ , равной большему из значений  $1/T_2$ ,  $1/T_3$ , уменьшается.

Для проведения технологической настройки постоянной времени посредством низкоомного проволочного резистора, обладающего большой стабильностью коэффициента передачи, может быть использована схема, приведенная на рис. 3, г. Постоянная времени такого устройства будет равна

$$T_{к.у} = R_2 C \frac{R'_1}{R_1}, \quad (13)$$

где  $R'_1$  — сопротивление верхней части резистора  $R_1$ .  $T_{к.у}$  будет меняться от нуля до максимального значения, равного  $R_2 C_1$ , что обеспечивает легкую перестройку корректирующего устройства в широком диапазоне.

В СКБ аналитического приборостроения АН СССР было разработано несколько приборов, в которых корректирующие устройства использовались для уменьшения динамических погрешностей термокондуктометрических и термомагнитных газоанализаторов. Одним из них является общепромышленный термокондуктометрический газоанализатор ТП5502, серийный выпуск которого освоен Выруским заводом газоанализаторов. В ТП5502 использована коррекция только одной из составляющих переходного процесса, но и это позволило уменьшить время переходного процесса в 2.5—3 раза. На рис. 4

Т а б л и ц а 3

Значение времени переходного процесса термокондуктометрического газоанализатора с блоком коррекции и без блока коррекции

Газовая смесь	Время переходного процесса, с	
	без блока коррекции	с блоком коррекции
Водород—азот	16.8	5.3
Водород—аргон	16.2	5.8
Водород—диоксид углерода	19.5	7.2
Гелий—азот	18.4	8.8
Воздух—метан	29.5	10.2
Диоксид углерода—азот	33.5	12.8

приведена схема блока коррекции, разработанного для ТП5502. Благодаря применению операционного усилителя на микросхеме К140УД8 блок коррекции имеет малое число элементов и несложен в изготовлении и настройке с помощью резистора  $R_1$ .

В табл. 3 приведены значения времени переходного процесса газоанализатора ТП5502 с блоком коррекции и без него. Данные свидетельствуют об эффективности выбранного способа улучшения динамических характеристик даже в случае применения одного корректирующего звена. Дальнейшее уменьшение времени переходного процесса может быть получено установкой дополнительных корректирующих звеньев.

Данный метод коррекции динамических характеристик применим в принципе для любого типа аналитических приборов, переходные характеристики которых имеют экспоненциальный вид.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Павленко В. А. Автоматические газоанализаторы. М., 1961.
2. Лыков А. В. Теплообмен. М., 1978.
3. Варгафтик Н. Л. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., 1963.
4. Зубов В. Г. — Изв. вузов. Приборостроение, 1972, т. 15, № 2, с. 108.
5. Шукшунев В. Е. Корректирующие звенья в устройствах измерения нестационарных температур. М., 1970.