

ВЫБОР РЕЖИМА ПИТАНИЯ ТЕРМОКОНДУКТОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ В АНАЛИЗАТОРАХ МЕТАНА

В. И. Голинько, докт. техн. наук (НГУ, г. Днепропетровск), А. К. Котляров, канд. техн. наук (ОАО «Красный металлист», г. Конотоп Сумской обл.)

Виконано аналіз різних режимів живлення термокондуктометричних датчиків, що використовуються в стаціонарних аналізаторах метану. Рекомендовано режим живлення зі стабілізацією напруги на робочому елементі датчика, який забезпечує найвищу чутливість і мінімальну нелінійність аналізатора.

В последнее время все большее внимание уделяется использованию метана, капируемого дегазационными системами угольных шахт, как энергетического сырья. Важным элементом, обеспечивающим при этом безопасную работу систем дегазации и утилизации капируемого газа, является контроль концентраций метана в газовой смеси. Одним из распространенных методов контроля концентрации метана в дегазационных трубопроводах является термокондуктометрический [1]. Термокондуктометрические датчики обычно включаются в неуравновешенные мостовые измерительные схемы газоанализаторов, особенности которых достаточно хорошо освещены в литературе [2, 3].

В существующих термокондуктометрических анализаторах метана мостовые измерительные схемы с термокондуктометрическими датчиками обычно питают стабильным напряжением (рис. 1, а). Известны также другие схемы питания измерительных мостов с термокондуктометрическими датчиками, в том числе со стабилизацией напряжения на одном из термоэлементов датчика и с питанием моста от источника стабильного тока [4, 5]. Эти схемы питания имеют определенные преимущества по сравнению с традиционной схемой включения с точки зрения чувствительности и линейности измерительного моста. Однако анализ работы этих схем выполнен в [5] без учета особенностей работы самих термокондуктометрических датчиков в многокомпонентных газовых смесях, что не позволяет сделать однозначный выбор наиболее целесообразной схемы включения.

Целью настоящей публикации является обоснование целесообразной схемы включения термокондуктометрических датчиков метана в мостовых измерительных схемах с учетом особенностей их работы в многокомпонентных газовых смесях.

При питании измерительного моста от источника стабильного напряжения (см. рис. 1, а) с учетом того, что он выполнен равноплечным, то

есть в воздухе $R_p = R_c$, а $R_1 = R_2$, выходное напряжение моста связано с изменением сопротивления рабочего элемента ΔR зависимостью [5]

$$U_{\text{ВЫХ}}^a = \frac{U_M \Delta R_p}{2(2R_c - \Delta R_p)}. \quad (1)$$

При стабилизации напряжения на рабочем или сравнительном элементе термокондуктометрического датчика (рис. 1, б и в) эта зависимость принимает вид

$$U_{\text{ВЫХ}}^b = \frac{U_M \Delta R_p}{4(R_c - \Delta R_p)}; \quad (2)$$

$$U_{\text{ВЫХ}}^в = \frac{U_M \Delta R_p}{4R_c}. \quad (3)$$

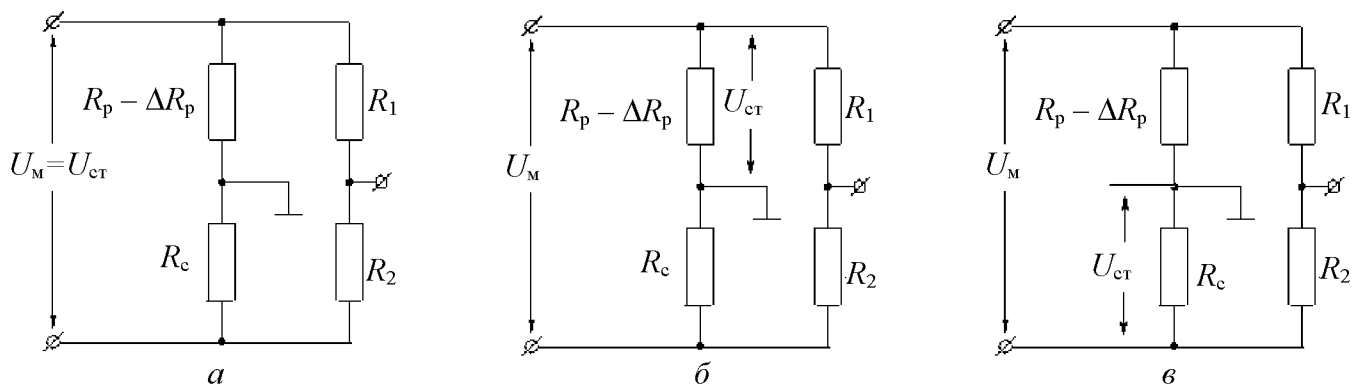


Рис. 1. Схемы питания неуравновешенных мостов

Из выражений (1)–(3) следует, что максимальная чувствительность моста с обеспечивается при стабилизации напряжения на рабочем элементе. Однако такая схема включения характеризуется наибольшей нелинейностью выходной характеристики моста относительно величины ΔR . При стабилизации напряжения на сравнительном элементе или питании моста от источника стабильного тока чувствительность ниже по сравнению с традиционной схемой включения, а выходной сигнал мостовой схемы линейно зависит от приращения сопротивления рабочего элемента.

Выражение (3) справедливо и при питании моста с термокондуктометрическим датчиком от стабилизированного источника тока $I = \text{const}$.

Относительная степень нелинейности выходной характеристики моста, рассчитанная для различных вариантов питания моста [5],

$$D_a = \frac{1}{2} \frac{\Delta R_p}{R_c}; \quad D_b = \frac{\Delta R_p}{R_c}. \quad (4)$$

Для определения величины R_p и ΔR воспользуемся зависимостью величины сопротивления терморезистора шарообразной формы, расположенного в центре шарообразной измерительной камеры, от газовой смеси, полученной авторами работы [6]:

$$R_3 = \frac{4\pi\lambda_{\text{см}}}{I_3^2(1/r_3 - 1/r_k)}(t_3 - t_k), \quad (5)$$

где I_3 – ток через элемент, А; t_3 и t_k – температура элемента и стенок камеры, °С; $\lambda_{\text{см}}$ – теплопроводность газовой смеси, вычисленная для газовой прослойки при средней температуре $t_m = (t_3 + t_k)/2$, Вт/(м·°С); r_3 и r_k – радиус элемента и камеры, м.

Температура платинового термоэлемента может быть рассчитана по выражению

$$t_3 = \left(\frac{R_3}{R_0} - 1 \right) \frac{1}{\beta}, \quad (6)$$

где R_0 – сопротивление термоэлемента при 0 °С, Ом; β – температурный коэффициент сопротивления, 1/°С.

Приняв температуру стенок камеры равной температуре анализируемой газовой смеси $t_k = t_r$ с учетом выражений (5) и (6) определим сопротивление термоэлемента, который находится в камере, заполненной воздухом и газовой смесью:

$$R_p = \frac{b\lambda_{\text{см}}R_r}{b\lambda_{\text{см}} - R_0\beta}, \quad (7)$$

$$R_c = \frac{b\lambda_B R_r}{b\lambda_B - R_0\beta}, \quad (8)$$

где $b_3 = \frac{4\pi}{I_3^2(1/r_3 - 1/r_k)}$; λ_B – теплопроводность воздуха при средней температуре, Вт/(м·°С); $R_r = R_0(1 + \beta)$ – сопротивление термоэлемента при температуре газа t_r .

Величину ΔR_p определим как разность выражений (8) и (7)

$$\Delta R_p = \frac{b\lambda_B R_r}{b\lambda_B - R_0\beta} - \frac{b\lambda_{\text{см}} R_r}{b\lambda_{\text{см}} - R_0\beta} = \frac{bR_r R_0\beta(\lambda_{\text{см}} - \lambda_B)}{(b\lambda_B - R_0\beta)(b\lambda_{\text{см}} - R_0\beta)}. \quad (9)$$

При практических расчетах принято считать, что теплопроводность смеси неполярных газов обладает аддитивными свойствами и однозначно зависит от концентрации газовых компонентов [5]. В этом случае теплопроводность бинарной метановоздушной смеси можно определить исходя из зависимости

$$\lambda_{\text{см}} = C\lambda_M + (1 - C)\lambda_B, \quad (10)$$

где λ_M – коэффициент теплопроводности метана, Вт/(м·°С); C – содержание метана в газовой смеси в долях единицы.

С учетом выражений (7)–(10) выходное напряжение моста при различных схемах питания составит

$$U_{\text{ВЫХ}}^a = \frac{U_M}{4} \frac{CR_0\beta(\lambda_M - \lambda_B)}{C(\lambda_M - \lambda_B)(b\lambda_B - 0,5R_0\beta) + \lambda_B(b\lambda_B - R_0\beta)}; \quad (11)$$

$$U_{\text{ВЫХ}}^b = \frac{U_M}{4} \frac{CR_0\beta(\lambda_M - \lambda_B)}{C(\lambda_M - \lambda_B)(b\lambda_B - R_0\beta) + \lambda_B(b\lambda_B - R_0\beta)}; \quad (12)$$

$$U_{\text{ВЫХ}}^B = \frac{U_M}{4} \frac{CR_0\beta(\lambda_M - \lambda_B)}{Cb\lambda_B(\lambda_M - \lambda_B) + \lambda_B(b\lambda_B - R_0\beta)}. \quad (13)$$

Из выражений (11)–(13) видно, что ни одна из рассмотренных схем питания не обеспечивает линейной зависимости выходного сигнала измерительного моста от концентрации метана в газовой смеси. Однако степень нелинейности и чувствительность мостовых измерительных схем существенно отличаются. Для большей наглядности ниже приведены выражения, описывающие зависимость выходного напряжения моста от концентрации метана, рассчитанные для конкретного термокондуктометрического датчика, включенного в мостовую измерительную схему при значении $U_M = 1,1$ В; $I_0 = 0,1$ А; $R_0 = 3$ Ом; $r_0 = 0,6 \cdot 10^{-3}$ м; $r_k = 5 \cdot 10^{-3}$ м; $t_T = 20$ °С.

$$U_{\text{ВЫХ}}^a = 0,425 \frac{C}{4,98 + 2,795C}; \quad (14)$$

$$U_{\text{ВЫХ}}^b = 0,425 \frac{C}{4,98 + 2,015C}; \quad (15)$$

$$U_{\text{ВЫХ}}^B = 0,425 \frac{C}{4,98 + 3,580C}. \quad (16)$$

На рис. 2 приведены зависимости выходного сигнала измерительного моста от концентрации метана в газовой смеси, построенные исходя из выражений (14)–(16). Нижняя кривая, полученная по выражению (16), соответствует схеме включения со стабилизацией напряжения на сравнительном элементе или питании измерительного моста от источника стабильного тока. Несмотря на то, что эти схемы питания обеспечивают линейность моста относительно изменения величины сопротивления рабочего термоэлемента ΔR_p [5], для них характерна наибольшая нелинейность зависимости выходного сигнала измерительного моста от концентрации метана, что обусловлено

нелинейным характером зависимости величины ΔR_p от концентрации метана. Кроме того, такие схемы включения характеризуются и меньшей чувствительностью по сравнению с другими исследованными схемами включения.

Средняя кривая, полученная по выражению (14), соответствует традиционной схеме включения со стабилизацией напряжения на измерительном мосте. Для нее характерна несколько меньшая нелинейность и более высокая чувствительность в сравнении с предыдущей.

Верхняя кривая, полученная по выражению (15), соответствует схеме включения со стабилизацией напряжения на рабочем элементе. Несмотря на то, что согласно выражению (4) для такой схемы включения характерна наибольшая нелинейность моста относительно изменения величины сопротивления рабочего термоэлемента ΔR_p , она обеспечивает меньшую нелинейность зависимости выходного сигнала измерительного моста от концентрации метана и более высокую чувствительность по сравнению с традиционной схемой включения.

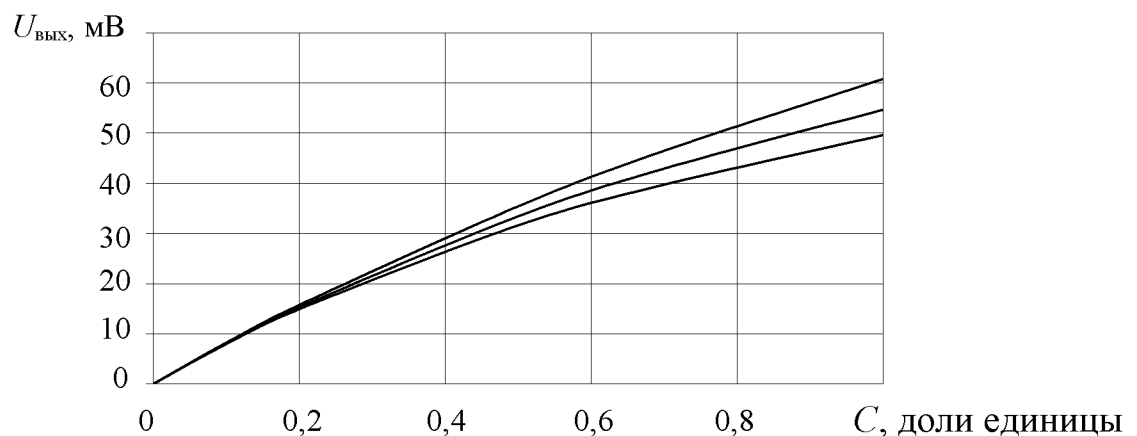


Рис. 2. Зависимости выходного сигнала измерительного моста от концентрации метана C в газовой смеси

Численный анализ полученных зависимостей показывает, что без принятия мер по линейризации шкалы в термокондуктометрическом анализаторе метана в случае применения схемы со стабилизацией напряжения на рабочем элементе приведенная погрешность измерения в средней части диапазона измерения доходит до 8%, что существенно ниже, чем при традиционной схеме включения. Однако для обеспечения требуемых метрологических характеристик анализаторов метана и в этом случае необходимо осуществлять линейризацию выходного сигнала измерительного моста.

Следует также отметить, что схема включения со стабилизацией напряжения на рабочем элементе термокондуктометрического датчика обеспечивает наиболее стабильный температурный режим термоэлементов в мостовых измерительных схемах при изменении температуры окружающей

среды [7], позволяет снизить погрешность измерения, вызванную температурными изменениями теплопроводности газовой смеси [8].

Таким образом, выполненный анализ различных режимов работы мостовых измерительных схем термокондуктометрических анализаторов метана показал, что среди известных схем включения наивысшую чувствительность и меньшую нелинейность зависимости выходного напряжения измерительного моста от концентрации метана обеспечивает схема включения со стабилизацией напряжения на рабочем элементе. Поскольку такая схема включения обеспечивает и наиболее стабильный температурный режим термоэлементов в мостовых измерительных схемах при изменении температуры окружающей среды, ее можно рекомендовать к использованию в анализаторах метана вместо традиционно применяемых схем включения со стабилизацией напряжения на измерительном мосте.

1. Карпов Е. Ф., Рязанов А. В. Автоматизация и контроль дегазационных систем. – М.: Недра, 1983. – 162 с.
2. Павленко В. А. Газоанализаторы. – М.-Л.: Машиностроение, 1965. – 296 с.
3. Карандеев К. Б. Специальные методы электрических измерений. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 344 с.
4. Голинько В. И., Романенко В. И., Фрундин В. Е. Обоснование мостовой измерительной схемы термокаталитических газоанализаторов // Сб. науч. тр. – НГУ. – 2003. – № 17. – Т. 2. – С. 352–357.
5. Котляров А. К. Обоснование режимов работы мостовых измерительных схем термокондуктометрических анализаторов метана // Наук. вісник НГУ. – 2006. – №11. – С. 62–65.
6. Карпов Е. Ф., Биренберг И. Э., Басовский Б. И. Автоматическая газовая защита и контроль рудничной атмосферы. – М.: Недра, 1984. – 285 с.
7. Голинько В. И., Котляров А. К. Исследование температурных режимов термоэлементов в мостовых измерительных схемах термокондуктометрических анализаторов метана // Науковий вісник НГУ. – 2006. – №12. – С. 55–58.
8. Голинько В. И., Котляров А. К. Повышение точности контроля содержания метана в дегазационных трубопроводах угольных шахт // Тр. междунар. науч.-техн. конф. «Форум гірників». – 2006. – С. 142–148.