

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСТОЯНСТВА ТЕРМОРЕЗИСТИВНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО ДАТЧИКА В РАСШИРЕННОМ ИНТЕРВАЛЕ РАБОЧИХ ТЕМПЕРАТУР

**А.В. КОВАЛЕВ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П.О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

Термохимический датчик (ТХД) в силу невысокой себестоимости, хорошо отлаженной технологии производства, неприхотливостью к изменению рабочих условий применения хорошо зарекомендовал себя в качестве измерительного элемента в различных газоаналитических системах контроля безопасности и управления технологическими процессами [1, 2]. Конструктивно ТХД состоит из двух преобразовательных элементов (ПЭ), представляющих собой терморезисторы прямого подогрева, на один из которых, называемый измерительным элементом (ИЭ), нанесен слой катализатора. Другой элемент, идентичный по своим теплофизическим и электрическим параметрам, – компенсационный элемент (КЭ). Сущность работы ТХД заключается в беспламенном каталитическом окислении горючих компонентов на поверхности ИЭ, следствием чего является повышение его температуры. Компенсационный же элемент предназначен для компенсации влияния температуры измеряемой среды (ИС). Термоэлементы предварительно разогреты протекающим по ним током для обеспечения заданной температуры, при которой происходит каталитическое окисление горючих компонентов.

Одной из основных характеристик ТХД является терморезистивный коэффициент (ТРК), характеризующий взаимосвязь электрических, тепловых и геометрических характеристик элементов датчика. Исходя из уравнения теплового баланса для ПЭ [1]

$$I^2 \cdot R = \alpha \cdot F \cdot (t - t_0), \quad (1)$$

где  $I^2 R = P_{эл}$  – электрическая мощность, подводимая к ПЭ;  $R$  – полное сопротивление ПЭ;  $\alpha$  – эффективный коэффициент теплообмена ПЭ с окружающей средой;  $t, t_0$  – температуры поверхности ПЭ и ИС;  $F$  – эффективная площадь теплообмена элемента ПЭ, терморезистивный коэффициент  $B$  определяется как

$$B = \frac{R}{\alpha \cdot F}. \quad (2)$$

В общем случае  $R$  и  $\alpha$  являются функциями температур  $t$  и  $t_0$ . Если значение сопротивления  $R$  в рабочем диапазоне температур применения ТХД изменяется в соответствии с известной зависимостью  $R = R_0(1 + \beta t)$ , где  $R_0$  – начальное сопротивление ПЭ;  $\beta$  – температурный коэффициент материала, из которого он изготовлен (как правило, это платина с  $\beta = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ), то изменение эффективного коэффициента теплообмена является сложной функцией температур  $t$  и  $t_0$ . На рассматриваемом диапазоне рабочих температур погрешность линейной аппроксимации сопротивления  $R$  не превышает 1 % от реального значения [3]. В [1] утверждается, что  $B$  является постоянной величиной в

области рабочих температур ИС и поверхности ПЭ. Однако реальные вольт-амперные характеристики ТХД не находят фактического подтверждения данного утверждения.

Воспользовавшись уравнением теплового баланса (1) и определением терморезистивного коэффициента (2) математическую модель ПЭ ТХД можно записать в следующем виде:

$$I^2 B = t - t_0. \quad (3)$$

Для определения ТРК были экспериментально получены вольт-амперные характеристики (ВАХ) в воздушной среде при отсутствии горючих компонентов одного из ПЭ ТХД типа ТКС-1 [4], другой же при этом использовался в качестве термометра сопротивления. Соответственно при снятии ВАХ второго элемента, первый использовался в качестве термометра сопротивления. ВАХ были получены на постоянном токе с использованием вольтметров В7-40/5 класса точности 0,1 и регулируемого источника тока при различных температурах ИС. Температура ИС задавалась при подключении ко второму регулируемому источнику тока нагревательного элемента, выполненного из материала с высоким ТКС и равномерно расположенного вокруг реакционной камеры. Реакционная камера с нагревательным элементом была помещена в термос из теплоизоляционного материала. Метрологические характеристики ПЭ ТХД в паспорте датчика приведены в области токов 0,08...0,14 мА и исходя из этого ВАХ снимались в этом диапазоне токов. На рис. 1 представлены полученные ВАХ ИЭ одного из девяти исследованных датчиков с  $R_0 = 3,96 \text{ Ом}$  и  $\beta = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ 1}^{\circ}\text{C}$  при температурах ИС 30, 65, 100  $^{\circ}\text{C}$ .

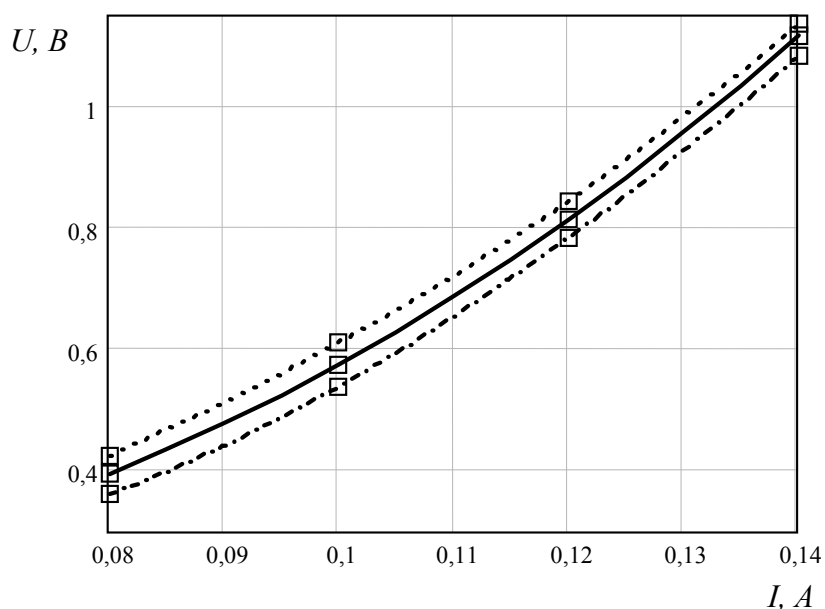


Рис. 1. ВАХ измерительного элемента при различных температурах ИС:  $t_0$  (30  $^{\circ}\text{C}$  - - - -), (65  $^{\circ}\text{C}$  — — —), (100  $^{\circ}\text{C}$  - - - -), □ – экспериментально найденные точки ВАХ

Для нахождения температуры поверхности ПЭ вначале определялось его электрическое сопротивление

$$R(I, t_0) = \frac{U(I, t_0)}{I} \quad (4)$$

с дальнейшим пересчетом найденного значения в температуру по следующей формуле:

$$t(I, t_0) = \frac{R(I, t_0) - R_0}{R_0 \beta}. \quad (5)$$

Результаты расчета представлены на рис. 2.

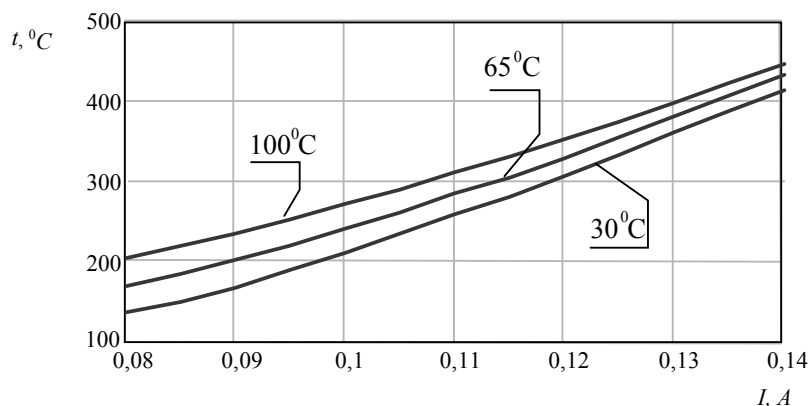


Рис. 2. Изменение температуры поверхности  $t$  в функции  $t_0$  и  $I$

Эффективная тепловая проводимость элемента (произведение эффективного коэффициента теплообмена на эффективную площадь теплообмена) определялась из уравнения теплового баланса:

$$\alpha(I, t_0)F = \frac{UI}{t(I, t_0) - t_0}. \quad (6)$$

Результаты расчета представлены на рис. 3.

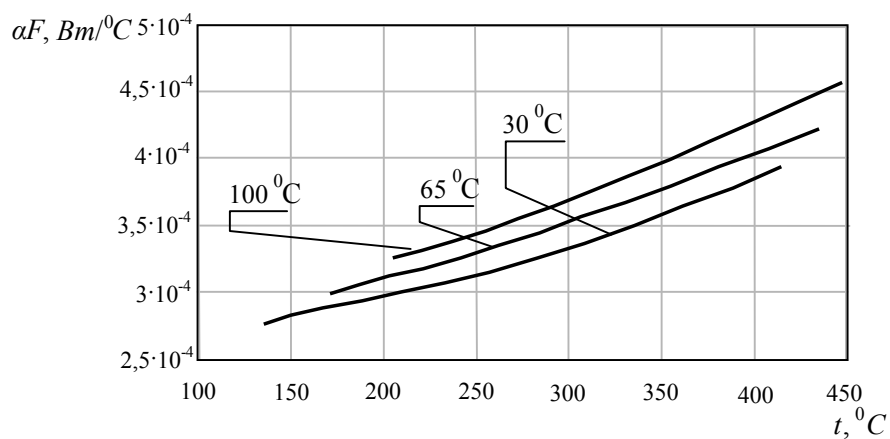


Рис. 3. Семейство эффективных тепловых проводимостей измерительного элемента в функции температуры поверхности  $t$  и ИС  $t_0$

ТРК находился в виде:

$$B(I, t_0) = \frac{R(I, t_0)}{\alpha(I, t_0) \cdot F}. \quad (7)$$

Полученные результаты представлены на рис. 4.

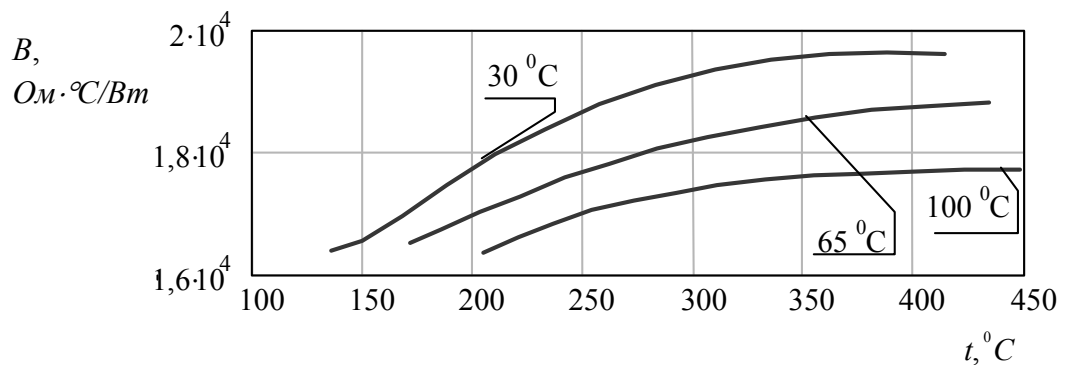


Рис. 4. Зависимости терморезистивного коэффициента  $B$  от температуры поверхности  $t$  и температуры ИС

Анализ характера изменения терморезистивного коэффициента в функции температур поверхности и ИС позволяет заключить, что в области рабочих токов (110–130 мА) значение ТРК не является постоянным, а изменяется на 6 % и на 10 % в области рабочих температур  $t_0$  (30–100 °С). Полученные результаты говорят о неадекватности модели элементов ТХД с постоянством ТРК, особенно в расширенном интервале температур  $t_0$ .

Из зависимостей, представленных на рис. 4, видно, что поведение ТРК в области рабочих температур носит линейный характер зависимости от температуры поверхности элемента и температуры ИС, что дает основание предположить следующую аппроксимирующую функцию ТРК:

$$B = B_0(1 - Ct_0 + At), \quad (8)$$

где  $B_0$ ,  $A$ ,  $C$  – неизвестные коэффициенты аппроксимирующей зависимости ТРК. Для нахождения коэффициентов  $B_0$ ,  $A$ ,  $C$  достаточно иметь 3 расчетные точки экспериментально снятых ВАХ, причем для упрощения их нахождения две из них должны быть сняты при одинаковых температурах поверхности, но при разных температурах ИС. На рис. 5 показаны значения ТРК, рассчитанные по экспериментально снятым точкам ВАХ при трех различных температурах ИС, и расчетные зависимости терморезистивных коэффициентов по выражению (7). Коэффициенты рассчитывались по следующей методике:

– полученные данные для расчетных точек представлены в следующей таблице

$B, \text{ Ом} \cdot \text{°C/Wt}$	$B1 = 1,735 \cdot 10^4$	$B2 = 1,773 \cdot 10^4$	$B3 = 1,955 \cdot 10^4$
$t, \text{ °C}$	$T1 = 300$	$T2 = 420$	$T2 = 420$
$t_0, \text{ °C}$	$T01 = 100$	$T01 = 100$	$T02 = 30$

– по следующим расчетным формулам рассчитываются коэффициенты  $B_0$ ,  $A$ ,  $C$ :

$$A' = \frac{B2 - B1}{T2 - T1}, \quad C' = \frac{B2 - B3}{T02 - T01},$$

$$B_0 = B3 + C'T02 - A'T2, \quad A = \frac{A'}{B_0}, \quad C = \frac{C'}{B_0}.$$

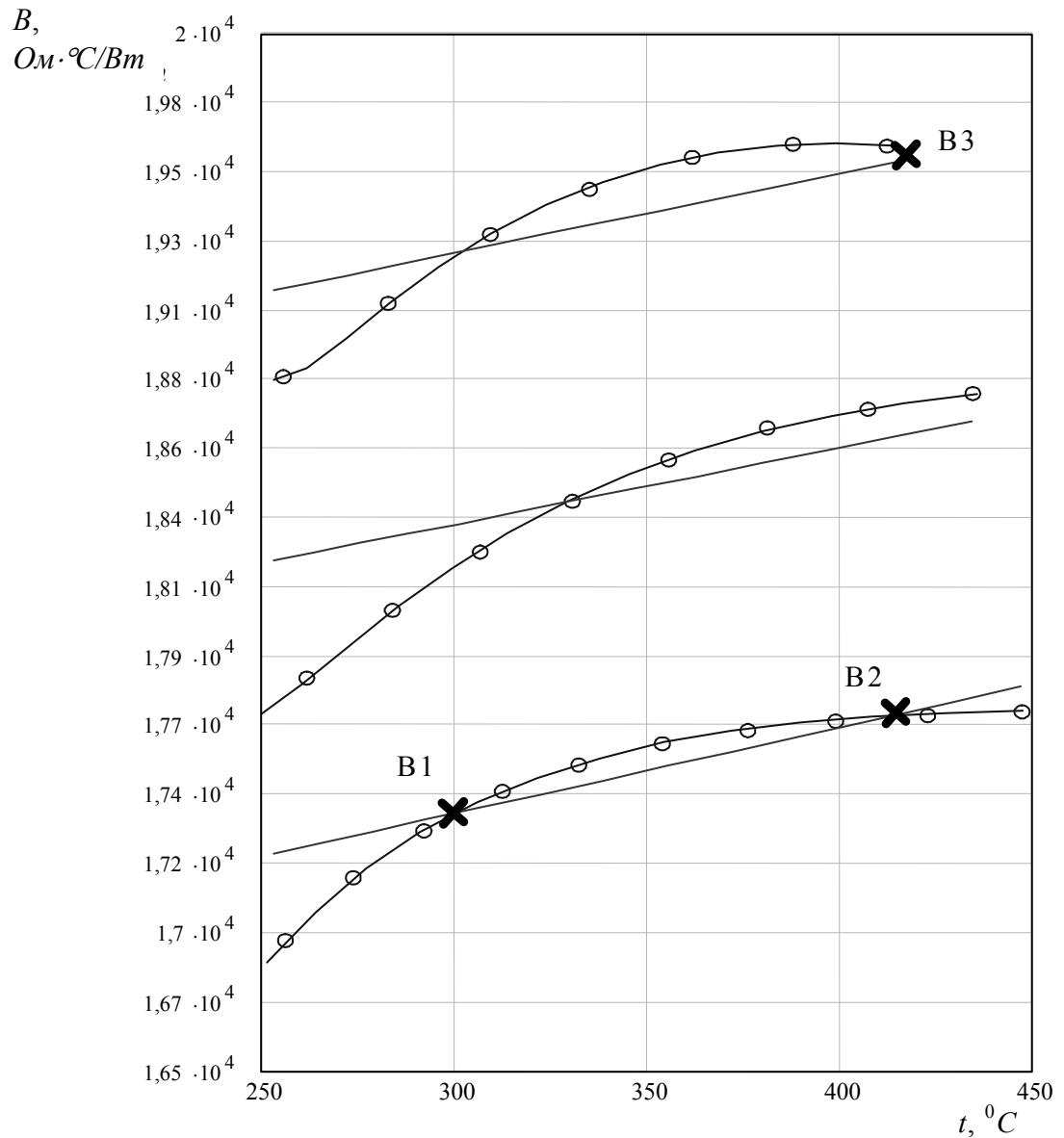


Рис. 5. Зависимости экспериментальных ( $\ominus$ ) и расчетных (—) ТРК при различных температурах

При наличии ПЭВМ аппроксимацию терморезистивного коэффициента можно провести любым из известных способов при наличии хотя бы трех точек ВАХ, причем одна из них должна быть снята при другой температуре ИС. В результате чего для рассматриваемого экземпляра терморезистивный коэффициент выглядит следующим образом:

$$B = 1,919 \cdot 10^4 (1 + 1,477 \cdot 10^{-4} \cdot t - 1,385 \cdot 10^{-3} \cdot t_0). \quad (9)$$

При использовании зависимости терморезистивного коэффициента вида (8) температура поверхности элемента ТХД находится из уравнения теплового баланса (1) следующим образом:

$$t = \frac{I^2 B_0 + t_0 (1 - I^2 B_0 C)}{1 - I^2 B_0 A}.$$

Расчетные точки для теоретических ВАХ были получены, используя выражение вида:

$$U = IR_0(1 + \beta(BI^2 + t_0)) = IR_0(1 + \beta \frac{I^2 B_0 + t_0(1 - I^2 B_0 C)}{1 - I^2 B_0 A}).$$

На рис. 6 представлены экспериментальные и расчетные ВАХ, а на рис. 7 приведены зависимости разности значений этих ВАХ. Из последнего графика видно, что математическая модель ТХД (3) с линейно зависящим ТРК от температуры ИС и поверхности ПЭ позволяет более адекватно описывать поведение ПЭ по сравнению с определением (2). Максимальное значение разности напряжений реальной ВАХ и ВАХ, рассчитанной по последнему выражению, составляет 10 мВ при токе 0,13 А, при этом же токе значение напряжения, составляет 0,95 В, что соответствует погрешности, полученной расчетной ВАХ менее одного процента. В предположении постоянства терморезистивного коэффициента погрешность расчетных ВАХ составляет порядка 3...4 %. На основании сказанного, уравнение теплового баланса можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} I^2 \cdot B_{0И}(1 + A_{И}t_{И} - C_{И}t_0) = t_{И} - t_0 - t_X \\ I^2 \cdot B_{0К}(1 + A_{К}t_{К} - C_{К}t_0) = t_{К} - t_0 \end{cases},$$

где  $B_{0И}$  ( $B_{0К}$ ),  $A_{И}$  ( $A_{К}$ ),  $C_{И}$  ( $C_{К}$ ) – коэффициенты аппроксимирующей функции терморезистивного коэффициента для измерительного и компенсационного ПЭ, соответственно;  $t_{И}$  ( $t_{К}$ ) – температура поверхности измерительного и компенсационного ПЭ, соответственно;  $t_X$  – приращение температуры измерительного ПЭ за счет беспламенного окисления горючих компонентов на его поверхности, пропорциональное их концентрации, или

$$\begin{cases} I^2 \cdot B_0(1 + At_{И} - Ct_0) = t_{И} - t_0 - t_X \\ I^2 \cdot B_0(1 + \delta_B)(1 + A(1 + \delta_A)t_{К} - C(1 + \delta_C)t_0) = t_{К} - t_0 \end{cases},$$

где  $\delta_B$ ,  $\delta_A$ ,  $\delta_C$  – отличия в значениях терморезистивных коэффициентов  $B_0$ , коэффициентов  $A$  и  $C$ , соответственно, для компенсационного и измерительного элементов датчика. По экспериментальным исследованиям отмеченной партии из 9 штук, рассмотренные отличия не превышают следующих значений:  $\delta_B - 8\%$ ,  $\delta_A - 30\%$ ,  $\delta_C - 7\%$ .

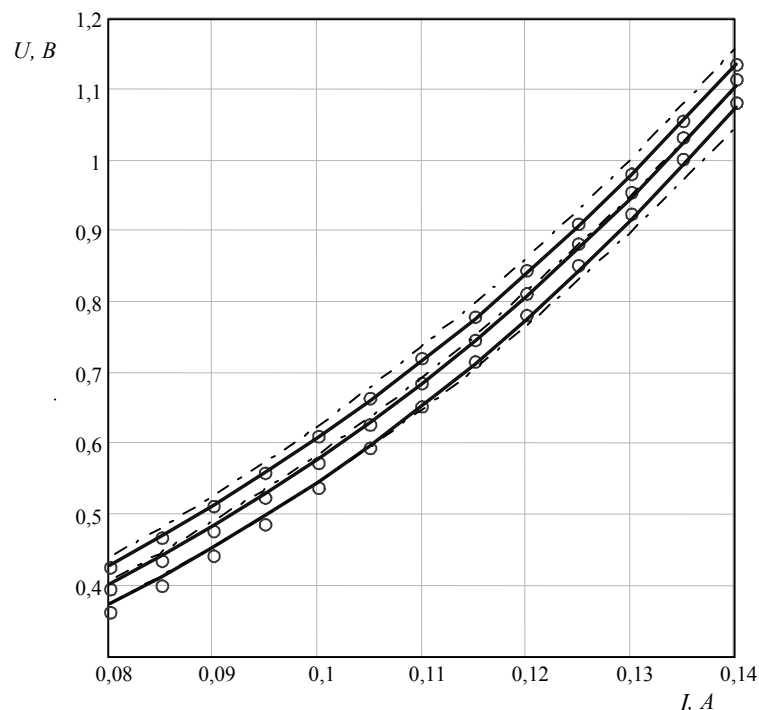


Рис. 6. Экспериментальные (—) и расчетные ВАХ (○ ○ ○ рассчитанные с использованием зависимости ТРК (8), - - - - - рассчитанные в предположении постоянства ТРК)

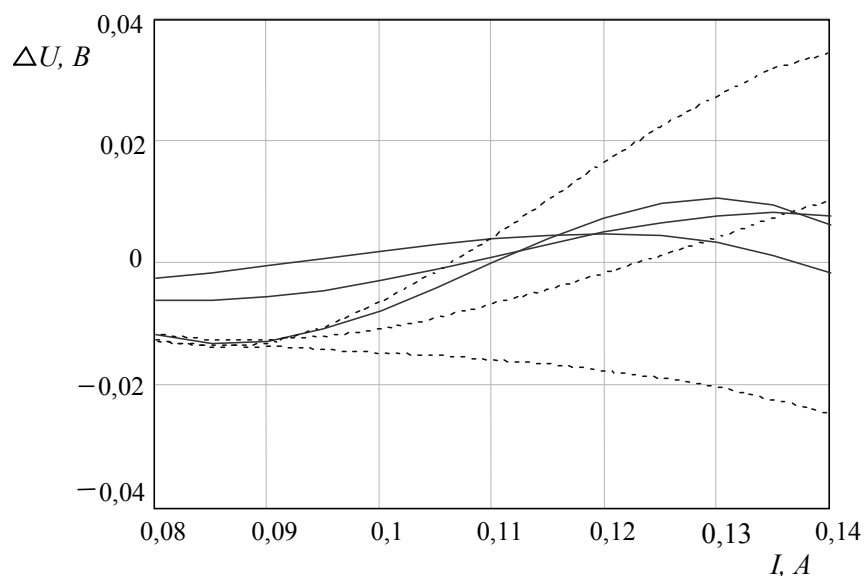


Рис. 7. Разность экспериментальных и расчетных ВАХ (— рассчитанные с использованием зависимости ТРК (9), - - - - - рассчитанные в предположении постоянства ТРК) при различных температурах

Полученная математическая модель позволяет более адекватно описывать поведение ТХД в расширенной области рабочих температур датчика, а описанная последовательность действий позволяет автоматизировать процесс нахождения ТРК для реального датчика по его ВАХ.

### Список литературы

1. Карпов Е.Ф., Биренберг И.Э., Басовский Б.И. Автоматическая газовая защита и контроль рудничной атмосферы. – М.: Недра, 1984. – 285 с.
3. Фурман Н.И., Щербань А.Н. Методы и средства контроля рудничного газа. – Киев: Наукова думка, 1965. – 408 с.
3. ГОСТ 6651-94. Термопреобразователи сопротивления. Общие технические требования и методы испытаний.
4. Элемент чувствительный ЧЭ ТКС-1. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Мн., 2000.

Получено 04.06.2004 г.