

УДК 62-78

**АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ  
ПОГРЕШНОСТИ КНС–СЕНСОРОВ ДАВЛЕНИЯ.  
ЧАСТЬ 1. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ТОЧНОСТЬ  
АЛГОРИТМИЧЕСКОГО МЕТОДА КОРРЕКЦИИ  
ПОГРЕШНОСТЕЙ СЕНСОРА ДАВЛЕНИЯ**

Ю.Г. Свинолулов, А.А. Светлаков<sup>1</sup>,  
М.М. Чухланцева<sup>2</sup>, Е.С. Учайкина<sup>3</sup>, В.К. Кулешов<sup>3</sup>

ОАО «Манотомь»

<sup>1</sup>Томский университет систем управления  
и радиоэлектроники

<sup>2</sup>Томский центр стандартизации, метрологии  
и сертификации

<sup>3</sup>Томский политехнический университет  
E-mail: uchaikina2@mail.ru

**Свинолулов Юрий Григорьевич**, канд. техн. наук, заместитель генерального директора ОАО «Манотомь», г. Томск.

E-mail: sjg@manotom-tmz.ru

Область научных интересов: квантовая теория твердых тел, материаловедение, теория решения обратных задач, реконструктивная вычислительная диагностика, вычислительная томография, обработка изображений, радиационный контроль.

**Светлаков Анатолий Антонович**, д-р техн. наук, профессор кафедры информационно-измерительной техники Томского университета систем управления и радиоэлектроники.

E-mail: iit@tomsk.tusur.ru

Область научных интересов: измерительная техника.

**Чухланцева Марина Михайловна**, кад. техн. наук, доцент, профессор РАЕ, директор Федерального государственного учреждения «Томский центр стандартизации, метрологии и сертификации».

E-mail:

chuhlantseva@tcsms.tomsk.ru

Область научных интересов: метрология.

**Учайкина Елена Сергеевна**, аспирант, ассистент кафедры «Физические методы и приборы контроля качества» Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: uchaikina2@mail.ru

Область научных интересов: обработка изображений, вычислительная диагностика, квантовые компьютеры, программирование.

**Кулешов Валерий Константинович**, д-р техн. наук, профессор кафедры физических методов и приборов контроля качества Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: uchaikina2@mail.ru

Область научных интересов: исследование высокочувствительных детекторов излучения и разработка приборов на их основе, вычислительная диагностика.

Алгоритмический метод коррекции погрешностей заключается в разработке математической модели, описывающей функцию преобразования сенсора давления и учитывающей погрешности сенсора, вызванные нелинейностью и температурной зависимостью, а также разработке методики определения параметров математической модели.

**Ключевые слова:**

Математическая модель, погрешность, КНС-сенсор давления.

Схемотехнические методы коррекции температурной погрешности тензопреобразователей (ТП) давления при питании постоянным напряжением рассмотрены в работе [1]. При питании ТП от источника тока могут быть использованы возможности физико-технологического метода коррекции температурной погрешности ТП, что очень хорошо показано в работах [1–4]. На практике не удается достичь полной коррекции температурных погрешностей физико-технологическими методами, поэтому требуется дополнительное использование других методов коррекции температурной погрешности, в частности алгоритмическая.

Рассмотрим теоретические возможности алгоритмического метода коррекции погрешностей сенсора давления. По результатам проведенных нами исследований [5–7] информацию о температуре «кремния на сапфире» – сенсора (КНС-сенсора) возможно получить, измеряя полное сопротивление моста или падение напряжения на мосте при питании от генератора тока. Для определения значения контролируемого давления  $P$  по выходному напряжению сенсора  $U_d$ , являющемуся функцией  $U_d = f(P, T)$ , естественным методом является определение давления  $P$  по обратной функции [8], опи-

связывающей зависимость выходных напряжений  $U_d$  (напряжение в измерительной диагонали ТП) и  $U_m$  (напряжение в питающей диагонали ТП) от давления  $P$  и температуры  $T$ . Напряжения  $U_d$ ,  $U_m$  являются функциями величин  $P$  и  $T$ , действующих на входе ТП. Рассматриваемый сенсор упрощенно можно описать системой уравнений:

$$U_d = f_1(P, T), \quad (1)$$

$$U_m = f_2(P, T).$$

Преобразуем систему уравнений (1) к виду:

$$P = \Phi_1(U_d, T), \quad (2)$$

$$T = \Phi_2(U_m, P).$$

Подставим  $T = \Phi_2(U_m, P)$  в первое уравнение системы (2):

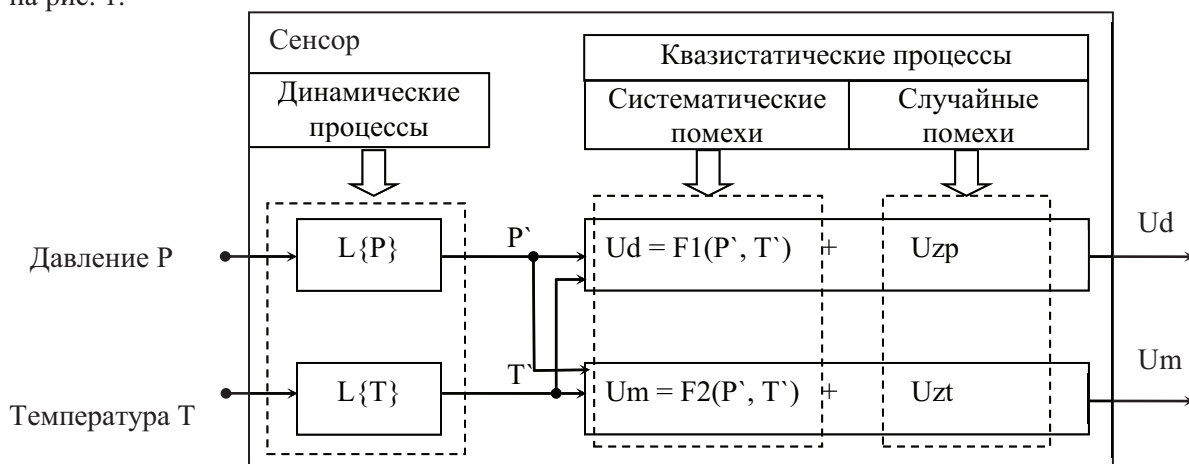
$$P = \Psi(U_d, U_m), \quad (3)$$

$$T = \Phi_2(U_m, P).$$

Таким образом, из системы уравнений (3) следует, что параметр  $P$  является функцией только выходных величин  $U_d$ ,  $U_m$ :

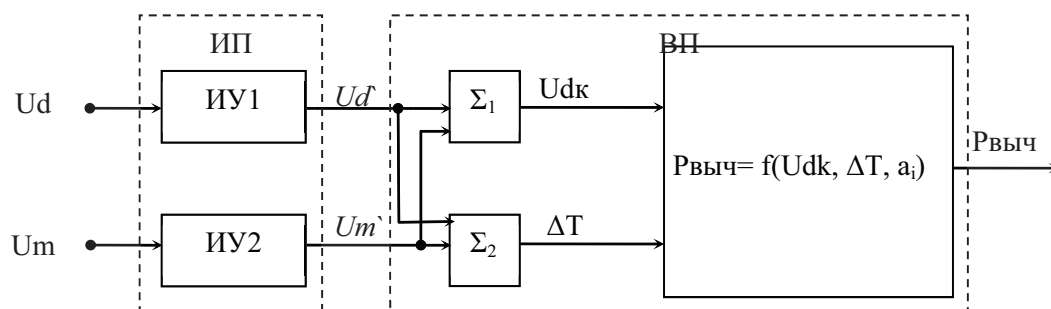
$$P = \Psi(U_d, U_m). \quad (4)$$

Структура модели КНС-сенсора давления, для которого основным источником дополнительной погрешности является температурная зависимость выходного сигнала [1], приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Структура КНС-сенсора давления, где  $P$  – давление,  $T$  – температура,  $U_d$  – напряжение в измерительной диагонали ТП,  $U_m$  – напряжение в питающей диагонали ТП,  $U_{zp}$  и  $U_{zt}$  – выходные скорректированные сигналы,  $L\{P\}$  – чувствительность от давления,  $L\{T\}$  – чувствительность от температуры

В данном случае рассмотрим только квазистатические процессы: измеряемые величины – давление и температура – изменяются относительно медленно, и поэтому динамические свойства измерительных и вычислительных устройств не влияют на погрешность коррекции. Блок-схема системы с КНС-сенсором, в которой применен алгоритмический метод коррекции, показана на рис. 2.



**Рис. 2.** Структура измерительно-вычислительного преобразователя в измерительном преобразователе давления (ИПД) с КНС-сенсором

На рис. 2 показана структура измерительно-вычислительного преобразователя в ИПД с КНС-сенсором, где ИП – измерительный преобразователь; VP – вычислительный преобразователь; ИУ – измерительное устройство,  $U_d$  – напряжение в измерительной диагонали ТП,  $U_m$  – напряжение в питающей диагонали ТП,  $U_d'$  и  $U_m'$  – выходные сигналы,  $U_{dk}$  – выходной скорректированный сигнал,  $\Sigma_1, \Sigma_2$  – суммирования,  $\Delta T$  – отклонение температуры измеряемой среды от номинальной, °С,  $a_j$  –  $j$ -й параметр статической функции преобразования тензопреобразователя,  $P_{выч}$  – вычисляемое давление.

Рассмотрим работу системы с двумя измеряемыми величинами (давлением  $P$  и температурой  $T$ ) на примере измерения давления. Влияние величины  $T$  вызывает погрешность измерения давления  $P$ , информация о котором содержится в выходном сигнале сенсора  $U_d$ :

$$U_d = f(P) = f_H(P) + \Delta b,$$

где  $f(P)$  – реальная функция преобразования сенсора давления;  $f_H(P)$  – номинальная характеристика преобразования;  $\Delta b$  – погрешность преобразования, приведенная к выходу.

Пусть  $\Delta b$  есть известная функция измеряемой величины  $P$  и влияющей величины  $T$ :

$$\Delta b = F(T, P).$$

Выходные сигналы  $U_d'$  и  $U_m'$ , соответствующие  $P$  и  $T$ , вводятся в вычислительный блок. Выходной скорректированный сигнал  $U_{dk}$  вычисляется по известной функции с учетом номинального значения  $P_H$  входной величины:

$$U_{dk} [P_H = f_H^{-1}(U_{dk})],$$

$$\Delta b_{выч} = F(U_m', P_H).$$

В точке суммирования  $\Sigma_1$  образуется разность:

$$U_{dk} = U_d - \Delta b_{выч} = f_H(P) + \Delta b - \Delta b_{выч} = f_H(P) + \Delta kb,$$

где  $\Delta kb$  – погрешность коррекции, приведенная к выходу ИУ1.

Значение  $\Delta kb$  определяется погрешностями измерения величин  $P$  и  $T$  измерительными устройствами ИУ1, ИУ2 и соответствием параметров функции  $\Delta b_{выч}$ , заложенных в вычислительный блок, параметрам реальной функции  $\Delta b$ .

Погрешность коррекции, приведенная к входу ИУ1, определится [9]:

$$\Delta k = \Delta kb / f_H(P).$$

Реальную статическую функцию преобразования сенсора давления можно представить в виде:

$$U_d = f(a_1, a_2, \dots, a_n, X_{1H}, X_{2H}, \dots, X_{pH}),$$

где  $a_j$  –  $j$ -й параметр статической функции преобразования тензопреобразователя;  $X_i$  –  $i$ -й воздействующий фактор.

Номинальная характеристика преобразования выразится в виде [8]:

$$U_{dH} = f(a_1, a_2, \dots, a_n, X_{1H}, X_{2H}, \dots, X_{pH}).$$

С целью оценки эффективности коррекции проведем расчет погрешности КНС-преобразователя давления.

Номинальная характеристика КНС-преобразователя давления выражается формулой:

$$U_{дн} = a_4 \times P,$$

где  $P$  – входное (измеряемое) давления, выраженное в процентах от диапазона измерения;  $U_{дн}$  – напряжение в измерительной диагонали тензомоста, запитанного от источника постоянного тока, мВ;  $a_4 = 1$  мВ/%.

Это означает, что при давлении, равном 0 %, выходное напряжение  $U_{дн}$  равно 0 мВ, а номинальный коэффициент преобразования составляет 1 мВ на единицу измерения давления (%). Согласно паспортным характеристикам, диапазон изменения выходного сигнала КНС-преобразователя давления лежит в интервале 160...440 мВ, но для простоты пересчета в проценты погрешностей примем номинальный диапазон изменения выходного сигнала равным 100 мВ.

Так как реальная функция преобразования нелинейная, то приходится учитывать также квадратичный член этой зависимости, кроме того, имеется начальное смещение выходного сигнала:

$$U_d = a_1 + a_4 \times P + a_7 \times P^2,$$

где  $a_1$  – начальное смещение выходного сигнала (значение выходного напряжения при давлении, равном нулю), мВ, номинально лежит в пределах  $\pm 5$  % от диапазона изменения выходного сигнала, примем  $a_1 = 1$  мВ (1 %);  $a_7$  – коэффициент, отражающий нелинейность зависимости выходного напряжения  $U_d$  от давления  $P$ ,  $a_7 = 2 \cdot 10^{-5}$  мВ/%<sup>2</sup> (соответствует паспортным данным – погрешность от нелинейности не превышает 0,2 % от диапазона изменения выходного сигнала).

Отклонение температуры измеряемой среды на 10 °С от номинальной (20 °С) вызывает относительное изменение начального выходного сигнала на 1 %, чувствительности на 1 %, а относительное квадратичное изменение чувствительности на 0,1 %, т. е.

$$U_d = a_1 (1 + a_2 \times \Delta T + a_3 \times T^2) + a_4 (1 + a_5 \times \Delta T + a_6 \times T^2) \times P + a_7 (1 + a_8 \times \Delta T + a_9 \times T^2) \times P^2,$$

где  $\Delta T$  – отклонение температуры измеряемой среды от номинальной, °С;  $a_2 = a_8 = 0,1$  ед./°С;  $a_5 = 10^{-3}$  ед./°С;  $a_6 = 10^{-6}$  ед./°С<sup>2</sup>;  $a_3 = a_9 = 10^{-4}$  ед./°С<sup>2</sup>.

Погрешность КНС-сенсора, приведенная к выходу, равна

$$\Delta b = \Psi(a_1, a_2, \dots, a_9, \Delta T, P) = U_d - U_{дн} = a_1 (1 + a_2 \times \Delta T + a_3 \times T^2) + a_4 (a_5 \times \Delta T + a_6 \times T^2) \times P + a_7 (1 + a_8 \times \Delta T + a_9 \times T^2) \times P^2.$$

Пусть ИПД с КНС-сенсором эксплуатируется в диапазоне температур от минус 40 до плюс 70 °С. Тогда максимальное отклонение рабочей температуры от номинальной составит  $\Delta T_{max} = 60$  °С. Тогда погрешность КНС-преобразователя при отсутствии коррекции:

$$\Delta b_{max} = 1(1 + 0,1 \cdot 60 + 10 - 4 \cdot 602) + 1(0,001 \cdot 60 + 10 - 6 \cdot 602)P + 2 \cdot 10^5 (1 + 0,1 \cdot 60 + 10^{-4} \cdot 60^2)P,$$

$$\Delta b_{max} = 7,36 + 0,0636P + 1,472 \cdot 10^{-4} \cdot P^2.$$

В табл. 1 приведены значения максимальной погрешности в зависимости от давления.

**Таблица 1.** Максимальная погрешность сенсора давления до коррекции

$P, \%$	0	50	100
$\Delta b_{max}, \text{ мВ } (\equiv \%)$	7,36	10,908	15,192

Пусть составляющие погрешностей равны: погрешность измерения напряжения  $U_d$  – 0,01 % ( $\delta_1 = 10^{-4}$ ) (соответствует разрешению ~13,5 разрядов), погрешность измерения  $U_m$  ( $\delta_2 = 5 \cdot 10^{-4}$ ) и определения  $\Delta T$  – 0,05 % ( $\delta_3 = 5 \cdot 10^{-4}$ ) (11 разрядов), погрешность определения коэффициентов  $a_i$  – 0,01 % ( $\delta_4 = 10^{-4}$ ) (нижний предел погрешности определяется случайной составляющей погрешности). Определим погрешность при наличии коррекции.

$$\Delta kb = U_{дк} - U_{дн} = \Delta b - \Delta b_{выч},$$

$$\begin{aligned} \Delta b_{\text{выч}} &= a_1(1+\delta_4)\left(1+a_2(1+\delta_4)\Delta T(1+\delta_3)+a_3(1+\delta_4)\Delta T^2(1+\delta_3)^2\right)+ \\ &+ a_4(1+\delta_4)\left(1+a_5(1+\delta_4)\Delta T(1+\delta_3)+a_6(1+\delta_4)\Delta T^2(1+\delta_3)^2\right)P+ \\ &+ a_7(1+\delta_4)\left(1+a_8(1+\delta_4)\Delta T\right)(1+\delta_3)+a_9(1+\delta_4)\Delta T^2(1+\delta_3)^2P^2 - a_4P, \\ \Delta kb &= a_1\left(1+a_2\Delta T+a_3\Delta T^2\right)+\left(1+a_5\Delta T+a_6\Delta T^2\right)P+ \\ &+ a_7\left(1+a_8\Delta T+a_9\Delta T^2\right)P - a_1(1+\delta_4)\left(1+a_2(1+\delta_4)\Delta T(1+\delta_3)\right)+ \\ &+ a_3(1+\delta_4)\Delta T^2(1+\delta_3)^2 - a_4(1+\delta_4)\left(1+a_5(1+\delta_4)\Delta T\right)(1+\delta_3)+ \\ &+ a_6(1+\delta_4)\Delta T^2(1+\delta_3)^2P^2 - a_7(1+\delta_4)\left(1+a_8(1+\delta_4)\Delta T\right)(1+\delta_3)+ \\ &+ a_9(1+\delta_4)\Delta T^2(1+\delta_3)^2P^2, \\ \Delta kb &= a_1\left(a_2\Delta T\left(1-(1+\delta_4)^2(1+\delta_3)\right)\right)+a_3\Delta T^2\left(\left(1-(1+\delta_4)^2(1+\delta_3)-\delta_4\right)+\right. \\ &+ a_4\left(a_5\Delta T\left(1-(1+\delta_4)^2(1+\delta_3)\right)\right)+a_6\Delta T^2\left(\left(1-(1+\delta_4)^2(1+\delta_3)-\delta_4\right)P+ \right. \\ &+ a_7\left(a_8\Delta T\left(1-(1+\delta_4)^2(1+\delta_3)\right)\right)+a_9\Delta T^2\left(\left(1-(1+\delta_4)^2(1+\delta_3)-\delta_4\right)P^2, \right. \\ \Delta kb &= a_1\left(a_2\Delta T\left(1-(1+\delta_4)^2(1+\delta_3)\right)\right)+a_3\Delta T^2\left(\left(1-(1+\delta_4)^2(1+\delta_3)-\delta_4\right)+\right. \\ &+ a_4\left(a_5\Delta T\left(1-(1+\delta_4)^2(1+\delta_3)\right)\right)+a_6\Delta T^2\left(\left(1-(1+\delta_4)^2(1+\delta_3)-\delta_4\right)P+ \right. \\ &+ a_7\left(a_8\Delta T\left(1-(1+\delta_4)^2(1+\delta_3)\right)\right)+a_9\Delta T^2\left(\left(1-(1+\delta_4)^2(1+\delta_3)-\delta_4\right)P^2. \right. \\ \Delta kb &= 1 \cdot (0,1 \cdot 60 \cdot (1-(1+10^{-4})^2 \cdot (1+5 \cdot 10^{-4}))) + 10^{-4} \cdot \Delta T^2 \cdot \\ &\cdot (1-(1+10^{-4})^2 \cdot (1+5 \cdot 10^{-4})^2) - 10^{-4} + \\ &+ 1 \cdot (10^{-3} \cdot 60 \cdot (1-(1+10^{-4})^2 \cdot (1+5 \cdot 10^{-4}))) + \\ &+ 10^{-6} \cdot 60^2 \cdot (1-(1+10^{-4})^2 \cdot (1+5 \cdot 10^{-4})^2) - 10^{-4}P + \\ &+ 2 \cdot 10^{-5} \cdot (0,1 \cdot 60 \cdot (1-(1+10^{-4})^2 \cdot (1+5 \cdot 10^{-4}))) + \\ &+ 10^{-4} \cdot 60^2 \cdot (1-(1+10^{-4})^2 \cdot (1+5 \cdot 10^{-4})^2) - 10^{-4}P^2, \\ \Delta kb &= -0,00473 - 0,000146P - 9,46 \cdot 10^8 P^2. \end{aligned}$$

В табл. 2 приведены значения погрешности коррекции в зависимости от давления.

**Таблица 2.** Погрешность алгоритмического метода коррекции

$P, \%$	0	50	100
$\Delta kb, \text{ мВ } (\equiv \%)$	-0,0047	-0,0123	-0,0203

Если сравнить полученные значения, то видно, что коррекция существенно уменьшит погрешность измерения давления КНС-сенсором. Следует заметить, что данные расчета не противоречат результатам, полученным в работах [7, 9]. Все вышеприведенные выражения для коррекции выходного сигнала  $U_d$  могут быть использованы для  $U_m$  тензопреобразователя для определения значения температуры, в цифровых измерительных преобразователях температуры это позволит помимо измеренного значения давления передавать в измерительную систему и значение температуры измеряемой среды. Таким образом, применение алгоритмического метода коррекции погрешности измерения давления и температуры КНС-преобразователя позволит существенно повысить точность измерения при условии выявления зависимостей выходных сигналов тензопреобразователя от входных измеряемых величин, т. е. определении адек-

ватной математической модели, описывающей передаточную функцию сенсора давления во всем рабочем диапазоне температур.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мартынов Д.Б., Стучебников В.М. Температурная коррекция тензопреобразователей давления на основе КНС // Датчики и системы. – 2002. – № 10. – С. 6–12.
2. Лурье Г.И., Стучебников В.М., Хасанов В.В. Использование структур КНС в низкотемпературных датчиках давления // Приборы и системы управления. – 1981. – № 9. – С. 20–21.
3. Стучебников В.М., Суханов В.И., Хасиков В.В. Тензорезисторные чувствительные элементы на основе структур «кремний на сапфире» в преобразователях давления для высоких температур // Приборы и системы управления. – 1981. – № 3. – С. 23–24.
4. Стучебников В.М. Физико-технологические методы оптимизации метрологических характеристик полупроводниковых тензопреобразователей // Датчики систем измерения, контроля и управления. Межвуз. Сборник научных трудов. Вып. 5. – Пенза: ППИ. – 1985. – С. 18–25.
5. Свинолулов Ю.Г., Подкопаев Н.Н., Бычков В.В. Датчики давления ДМ5007. Опыт разработки и серийного освоения // Достижения науки – производству: Сборник статей. – Томск: ТУСУР, 2003. – С. 63–69.
6. Свинолулов Ю.Г., Бычков В.В. Процессорные датчики давления и цифровые манометры // Достижения науки – производству: Сборник статей. – Томск: ТУСУР, 2003. – С. 69–85.
7. Свинолулов Ю.Г., Бычков В.В. Датчики давления и цифровые манометры ОАО «Манотомь» // Приборы. – 2004. – № 5. – С. 37–40.
8. Костров В.П., Пипин В.И., Рудницкий В.И. Погрешность линеаризации характеристик измерительных преобразователей // Электротехника. – 2001. – № 6. – С. 67–85.
9. ГОСТ 24026-80. Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения.

Поступила 12.04.2012 г.