

Удод Евгений Васильевич

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ  
ПЕРЕДАТОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫХ  
ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ**

*В работе показана значимость измерения давления в современной промышленности. Описана главная проблема современных датчиков давления на основе тензорезисторов, заключающаяся в значительной зависимости их выходных характеристик от температуры измеряемой среды. Продемонстрирована невысокая точность классического подхода к преобразованию сигналов с чувствительных элементов в значения давления. Предложен новый метод использования поверхностей в пространстве давлений и температуры. Продемонстрирована эффективность предложенного метода.*

*Тензорезистор, датчик, давление, температурная компенсация, математическая модель.*

Udod Evgeniy Vasilyevich

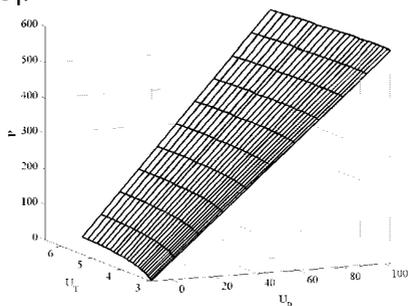
**MATHEMATICAL MODELS FOR THE CONSTRUCTION OF  
TRANSFER CHARACTERISTICS OF STRAIN-RESISTANT  
PRESSURE SENSORS**

*The paper shows the importance of pressure measurement in modern industry. The main problem of modern pressure sensors based on strain gages is described, which consists in a significant dependence of their output characteristics on the temperature of the measured medium. The low accuracy of the classical approach to converting signals from sensitive elements into pressure values is demonstrated. A new method of using surfaces in the pressure and temperature space is proposed. The effectiveness of the proposed method is demonstrated.*

Современное промышленное производство, транспортировка и добыча нефти и газа, воздушный, морской и наземный транспорт, системы метеопрогноза, пищевая промышленность, предприятия водоканала, ракетно-космическая отрасль, атомная энергетика в массовых количествах используют датчики давления. С помощью датчиков давления получают информацию о работе узлов и агрегатов двигателей, турбин, компрессоров, измеряют глубину водоемов и давление в скважинах, выполняют автоматическое регулирование в технологических установках на насосных станциях, контролируют расход энергоносителей в узлах учета [1-3].

Одним из наиболее распространённых видов датчиков давления являются тензорезистивные датчики давления. А одной из наиболее актуальных проблем при разработке тензорезистивных датчиков давления является решение задачи компенсации дополнительной погрешности, возникающей из-за влияния температуры, связанной со снижением чувствительности измерительного преобразователя при повышении температуры, вызванного в основном уменьшением сопротивления полупроводниковых резисторов, образующих тензомост. Так же на дополнительную температурную погрешность влияет неравномерное температурное расширение материалов, из которых построен датчик. Например, изменение температуры в диапазоне от минус 40 °С до 80 °С, может привести к изменению выходного напряжения чувствительного элемента на 36%.

Если построить зависимость реального давления ( $P$ ), действующего на чувствительный элемент от показаний каналов измерения давления ( $U_p$ ) и температуры ( $U_T$ ), то можно увидеть сильную нелинейность на графике (рис. 1) [1-3].



*Рис. 1. Экспериментальная пространственная функция преобразования тензорезистивного датчика давления*

При пересчёте сигналов, поступающих с чувствительных элементов можно использовать классическую линейную аппроксимацию пространственной функции преобразования, построенной при значении температуры соответствующем середине температурного диапазона датчика (нормальным условиям для типичного применения датчиков) давления [1-3]:

$$P = A_{\text{МБК}} + B_{\text{МБК}} U_P, \quad (1)$$

где  $P$  – давление;

$U_P$  – выходной сигнал канала давления чувствительного элемента датчика;

$A_{\text{МБК}}$ ,  $B_{\text{МБК}}$  – коэффициенты аппроксимации пространственной функции преобразования.

Но на практике данный метод вычислений значений давления даёт низкую (порядка 0,04%) приведённую погрешность вычислений значений давления при температуре, используемой для вычисления коэффициентов аппроксимации, и очень высокую при больших отклонениях температуры (порядка 11,96%) (рис. 2).

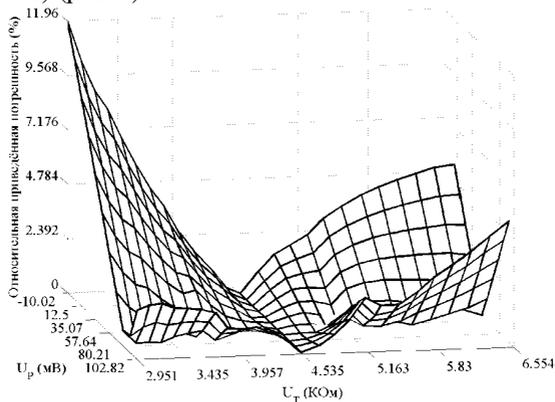


Рис. 2. Приведённая погрешность вычислений значений с использованием зависимости  $P = A_{\text{МБК}} + B_{\text{МБК}} U_P$

Для вычислений значений давления с компенсацией температурной погрешности с учётом нелинейности пространственной функции преобразования (ПФП) возможно использование математической модели ПФП ЧЭ рассматривать в виде системы локальных поверхностей, описанных функцией [1-3]:

$$P = f_{i\ell}(U_P, U_T). \quad (2)$$

Эти локальные поверхности ( $\Pi_{UT}^q, \Pi_{UT}^m$ ) перекрываются на границах, то есть  $\Pi_{UT}^q \cap \Pi_{UT}^m = \Pi_{UT}^{qm} \neq 0$ . Перекрывание границ снимает неопределенность при принятии решения о принадлежности к той или другой области сигналов каналов давления ( $U_{Pj}$ ) и температуры ( $U_{Tj}$ ), если значения этих сигналов формально принадлежат границе этих областей  $U_{Pj}, U_{Tj} \in \Pi_{UT}^{qm}$ .

Разбиение ПФП на локальные поверхности можно проводить как по давлению, так и по температуре. Построенная таким образом система локальных пространственных элементов является аппроксимацией экспериментальной пространственной функции преобразования тензорезистивного чувствительного элемента.

При построении модели пространственной функции преобразования для всей рабочей области датчика давления область  $P \times T$  значений давления и температуры, при которых проводились испытания ЧЭ, делится на несколько областей. Число областей  $G_{P\alpha}$  по давлению обозначим  $N_P$  ( $\alpha = 1, N_P$ ), число областей  $G_{T\beta}$  по температуре –  $N_T$  ( $\beta = 1, N_T$ ).

Каждой полученной области  $\Pi_{\alpha\beta} = G_{P\alpha} \cup G_{T\beta}$ , где  $\alpha = 1 \dots N_P$ ,  $\beta = 1 \dots N_T$  соответствует массив экспериментальных точек  $\{M_k^{\alpha\beta}(P_k, U_{P_k}, U_{T_k})\}_{k=1}^{n_{\alpha\beta}}$ .

На основе этих данных для области возможных значений электрических сигналов  $U_P \times U_T$  формируются подобласти  $\Pi_{U\alpha\beta} = G_{UP\alpha} \cup G_{UT\beta}$ , где  $G_{UT\beta}$  – область изменения сигнала  $U_T$ , соответствующая области изменения температуры  $G_{T\beta}$ ;

$G_{UP\alpha}$  – область изменения сигнала  $U_P$ , соответствующая области изменения давления  $G_{P\alpha}$  при условии  $U_T \in G_{T\beta}$ .

Для каждой подобласти  $\Pi_{U\alpha\beta}$ , где  $\alpha = 1 \dots N_P$ ,  $\beta = 1 \dots N_T$  вычисляются коэффициенты аппроксимации локальных пространственных элементов  $\Omega_{U\alpha\beta}$ , аппроксимирующие пространственную функцию преобразования датчика на области определения  $\Pi_{U\alpha\beta}$ .

Для построения  $\Omega_{U\alpha\beta}$  вместо выражения (2) используются различные функциональные соотношения, определяющие линейные и нелинейные пространственные элементы. Например:

1. Плоскости, описываемы выражением (МЛК) [1-3]:

$$P_{ij} = A_{MLK_{\alpha\beta}} + B_{MLK_{\alpha\beta}} U_{P_{ij}} + C_{MLK_{\alpha\beta}} U_{T_{ij}} \quad \text{при } \bar{i} = 1 \dots N_P, \bar{j} = 1 \dots N_T. \quad (3)$$

2. Параболические поверхности, описываемы выражением (МПК):

$$\left. \begin{aligned} P_{\bar{i}\bar{j}} &= A_{\text{МПК}_{\alpha\beta}} + B_{1\text{МПК}_{\alpha\beta}} U_{P_{\bar{i}\bar{j}}} + B_{2\text{МПК}_{\alpha\beta}} U_{P_{\bar{i}\bar{j}}}^2 \\ A_{\text{МПК}_{\alpha\beta}} &= \gamma_{00_{\alpha\beta}} + \gamma_{01_{\alpha\beta}} U_{T_{\bar{i}\bar{j}}} + \gamma_{02_{\alpha\beta}} U_{T_{\bar{i}\bar{j}}}^2, \\ B_{1\text{МПК}_{\alpha\beta}} &= \gamma_{10_{\alpha\beta}} + \gamma_{11_{\alpha\beta}} U_{T_{\bar{i}\bar{j}}} + \gamma_{12_{\alpha\beta}} U_{T_{\bar{i}\bar{j}}}^2, \\ B_{2\text{МПК}_{\alpha\beta}} &= \gamma_{20_{\alpha\beta}} + \gamma_{21_{\alpha\beta}} U_{T_{\bar{i}\bar{j}}} + \gamma_{22_{\alpha\beta}} U_{T_{\bar{i}\bar{j}}}^2, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $\bar{i} = 1 \dots \bar{N}_P$  – номер экспериментальной точки по давлению при фиксированной температуре, принадлежащей текущей области разбиения,

$\bar{N}_P$  – число экспериментальных точек при фиксированной температуре;

$\bar{j} = 1 \dots \bar{N}_T$  – номер экспериментальной точки по температуре при фиксированном давлении, принадлежащей текущей области разбиения ПФ

$\bar{N}_T$  – количество экспериментальных точек при фиксированном давлении;

$P_{\bar{i}\bar{j}}$  – экспериментальное значение давления, принадлежащие текущей области разбиения ПФП чувствительного элемента (ЧЭ);

$U_{P_{\bar{i}\bar{j}}}$  – экспериментальное значение сигнала канала давления, принадлежащие текущей области разбиения ПФП ЧЭ;

$U_{T_{\bar{i}\bar{j}}}$  – экспериментальное значение температуры, принадлежащие текущей области разбиения ПФП ЧЭ;

$A_{\text{МЛК}_{\alpha\beta}}, B_{1\text{МЛК}_{\alpha\beta}}, B_{2\text{МЛК}_{\alpha\beta}}$  – коэффициенты аппроксимации для текущей области разбиения ПФП ЧЭ.

$A_{\text{МПК}_{\alpha\beta}}, B_{1\text{МПК}_{\alpha\beta}}, B_{2\text{МПК}_{\alpha\beta}}$  – коэффициенты аппроксимации для текущей области разбиения ПФП ЧЭ.

Рассмотрим порядок применения моделей ПФП ЧЭ для вычислений значений давления с компенсацией температурной погрешности

Использование модели вычислений значений давления с компенсацией температурной погрешности осуществляется следующим образом:

1. Исходными физическими сигналами являются давление  $P_k$  и температура  $T_k$ . Им соответствуют значения электрических сигналов канала давления  $U_{Pk}$  и канала температуры  $U_{Tk}$ .

2. По известным значениям электрических сигналов  $U_{Pk}$  и  $U_{Tk}$  и разбиении всей области определения электрических сигналов находится текущая область ПФП ЧЭ.

- 2.1. Определяется номер области по температуре ( $\bar{\beta}$ ), которой принадлежит текущее значение сигнала канала температуры ( $U_{Tj} \in \Pi_{\alpha\beta}$ ).
- 2.2. Используя найденный номер области разбиения ПФП ЧЭ по температуре ( $\bar{\beta}$ ), находится номер области ( $\bar{\alpha}$ ), которой принадлежит текущее значение сигнала канала давления ( $U_{Pj} \in \Pi_{\alpha\beta}$ ).
3. Таким образом, зная область разбиения ПФП ЧЭ, которой принадлежат текущие значения сигналов каналов давления и температуры выбираются заранее рассчитанные коэффициенты аппроксимации.
4. Вычисляется давление по выбранному полиному (5) или (6) используя коэффициенты аппроксимации, принадлежащие области  $\Pi_{\bar{\alpha}\bar{\beta}}$

Для анализа эффективности предложенной модели построены модели в математической системе MATLAB, которые показали, что наибольшее влияние на погрешность вычислений значений давления оказывают размеры локальных пространственных элементов по температуре, но и разбиение пространственной функции преобразования по давлению приводит к дополнительному снижению температурной погрешности.

Отметим, что, так как сигналы каналов давления и температуры содержат основную погрешность, необходимо произвести оценку влияния погрешности исходных данных на точность вычислений значений давления. На рис. 3 приведена зависимость погрешности вычислений значений давления МЛК от абсолютной величины амплитуды погрешности сигналов канала давления и температуры.

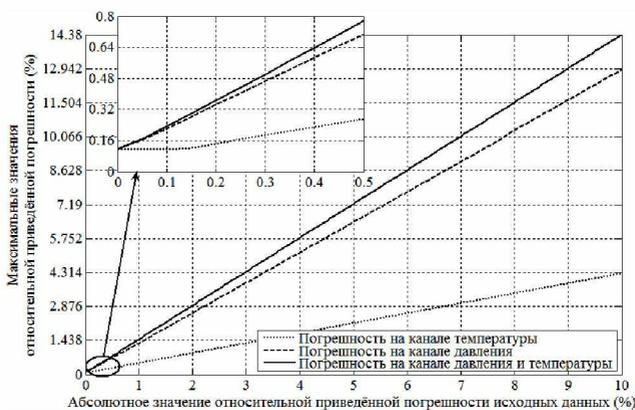


Рис. 3. Зависимость погрешности вычислений значений давления от погрешности исходных данных для МЛК

На рис. 4 показана зависимость погрешности вычислений значений давления МПК от абсолютной величины амплитуды погрешности исходных данных.

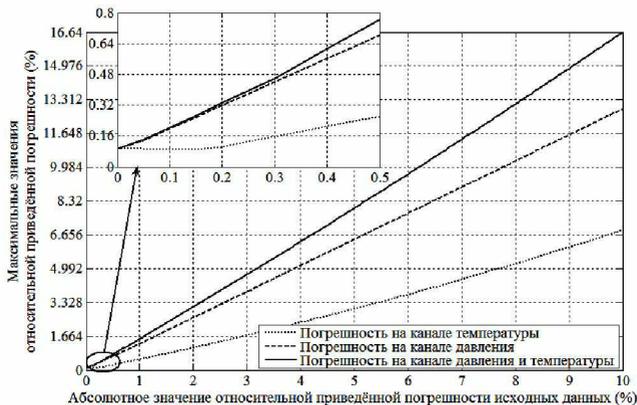


Рис. 4. Зависимость погрешности вычислений значений давления от погрешности исходных данных для МПК

На рис. 3, рис. 4 показано, что погрешность вычислений значений давления при изменении температуры во всём рабочем диапазоне датчика и корректно выбранных размерах локальных пространственных элементов, будет в 1,5 – 1,6 раза выше, чем погрешность входных сигналов. Отмечено, что наименьшую погрешность вычислений значений давления позволяет получить использование модели вычислений значений давления с компенсацией температурной погрешности, построенной на основе применения параболических пространственных элементов.

Таким образом, по полученным результатам можно заключить, что применение предложенных моделей вычислений значений давления с компенсацией температурной погрешности позволяет значительно снизить суммарную погрешность вычислений значений давления, даже при применении чувствительных элементов с довольно высокой основной погрешностью.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дж. Фрайден. Современные датчики. Справочник - Москва: Техносфера, 2005. - 592 с.

2. Пьявченко О.Н., Мокров Е.А., Панич А.Е., Клевцов С.И., Пьявченко А.О., Удод Е.В., Федоров А.Г. Методы, модели, алгоритмы и архитектура прецизионных интеллектуальных датчиков давления // Под ред. д.т.н. профессора О.Н. Пьявченко. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. – 130 с.

3. Клевцов С.И., Удод Е.В. Пространственная плоскостная модель градуировочной характеристики интеллектуального датчика давления // Известия ТРТУ. 2005. – №1. – С.99-107.

**Удод Евгений Васильевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры встраиваемых и радиоприёмных систем Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, пер. Некрасовский, 44, 347922, телефон: +7(863) 218-40-00 доб.30119, email: [evudod@sfedu.ru](mailto:evudod@sfedu.ru).

**Udod Eugene Vasilevich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), associate professor of embedded and radio receiving systems Southern Federal University, 347922, Russia, Taganrog, Nekrasovsky lane, 44, phone+7(863) 218-40-00 add.30119, email: [evudod@sfedu.ru](mailto:evudod@sfedu.ru).