

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ И ИСПЫТАНИЙ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

**Николаенко А.Ю., студент; Львов П.А., доц., к.т.н.; Львов А.А., проф., д.т.н.**  
(Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,  
г. Саратов, Россия)

Интеллектуальные датчики давления – перспективное направление развития первичных преобразователей. К их достоинствам можно отнести возможность компенсации основных и дополнительных погрешностей, возможность оценки достоверности и обработки информации. Интеллектуальные датчики давления применяются во многих отраслях промышленности: авиация, машиностроение, энергетика, химическая промышленность. Значительную часть предприятий, выпускающих интеллектуальные датчики давления, составляют предприятия оборонно-промышленного комплекса. Увеличение заказов на поставки измерительного оборудования требуют увеличения объемов выпуска датчиков. Поэтому на этих предприятиях выполняется переход к автоматизированному производству.

В рамках решения задачи автоматизации на производстве создаются системы мониторинга технологических процессов и испытания датчиков давления. Эти системы предназначены для определения и контроля параметров датчиков в нормальных и экстремальных климатических условиях. Структурная схема такой системы представлена на рисунке 1.

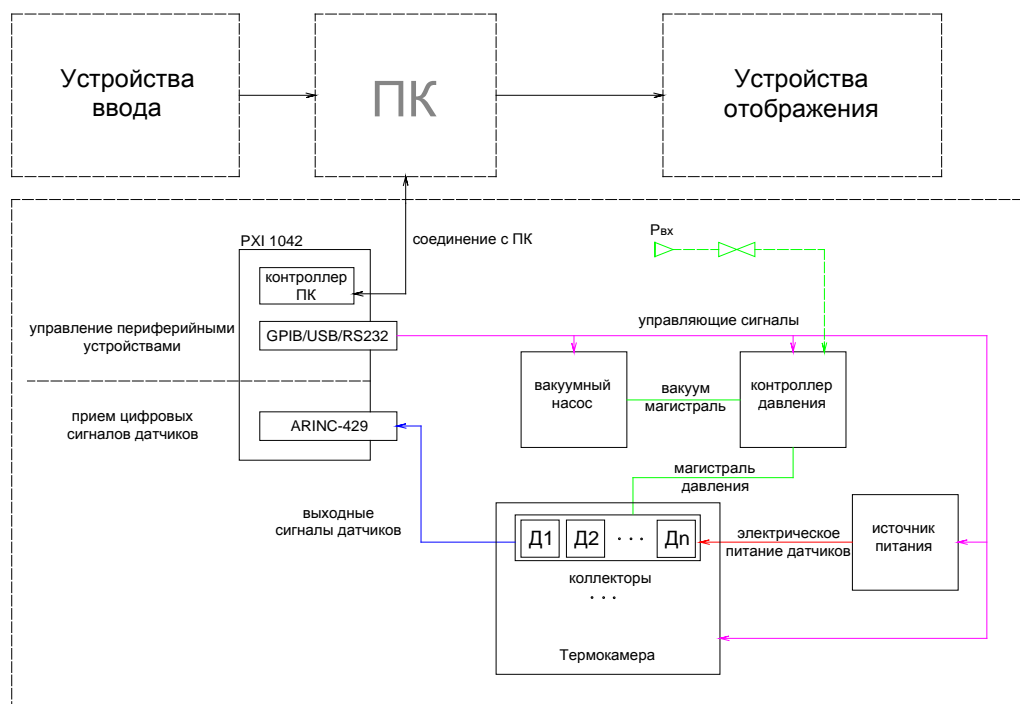


Рисунок 1 – Структурная схема системы

В состав аппаратной части системы входит:

- PXI 1042 – стойка (вмещает восемь слотов) с интегрированным контроллером, на базе процессора Intel с предустановленной ОС Windows 7;
- модуль интерфейса Arinc-429;
- вакуумный насос BECKER U-3.6;
- датчик давления Mensor CPC8000 – осуществляет подачу испытательного давления на датчики;
- климатические камеры (камера тепла ESPEC PNH-101M, камера холода ESPEC MC-811) – обеспечивают требуемые значения испытательных температур;

- программируемый источник питания (АКИП 1118) – обеспечивает питание датчиков, проходящих процесс стабилизации;
- коллектор – осуществляет распределение испытательного давления между определенным числом датчиков.

Механические характеристики датчиков давления существенно зависят от температуры, что приводит к возникновению значительной температурной составляющей погрешности измерений. При этом требования к точности измерений информации постоянно повышаются. Для обеспечения температурной независимости работы интеллектуальных датчиков давления предлагается следующая методика.

Исходно предполагается, что датчик рассчитан для проведения измерений в известном диапазоне давлений  $[P_{\min}, P_{\max}]$  и известном диапазоне температур  $[T_{\min}, T_{\max}]$ . Также предполагается, что контроллер давления и климатические камеры, входящие в состав установки, позволяют устанавливать данные параметры внутри указанных диапазонов с заданной точностью.

Поскольку не известен вид функциональной зависимости  $u = f(P, T)$ , связывающей выходной сигнал датчика  $u$  с входным давлением  $P$  и температурой окружающей среды  $T$ , то вид функции  $f$  можно найти только приближённо в результате экспериментальных исследований с помощью методов аппроксимации характеристик датчика, полученных опытным путём. Для аппроксимации будут использоваться полиномиальные зависимости. Также предполагается наличие ошибок измерения выходных сигналов  $u$ , т.е. реально измеряется следующая величина:

$$y = u + \xi, \quad (1)$$

где  $\xi$  – некоторая погрешность измерения.

Для снижения влияния случайных ошибок измерения в каждой отдельной исследуемой экспериментальной точке с координатами  $(P_j, T_i)$  проводится не одно измерение сигнала с выхода датчика, а серия из  $M$  измерений и вычисляется некоторое осреднённое значение сигнала в данной точке.

На основании экспериментальных данных можно аппроксимировать характеристику датчика  $u = h(P)$  полиномом некоторой степени  $n$ :

$$u = h(P) = a_0 + a_1 \cdot P + a_2 \cdot P^2 + \dots + a_n \cdot P^n = \sum_{r=0}^n a_r \cdot P^r, \quad (2)$$

где коэффициенты полинома  $a_r$  ( $r = 0, 1, \dots, n$ ) являются функциями температуры  $a_r = g_r(T)$ .

Методика поиска модели состоит из следующих этапов:

1. Получение и сбор необходимых экспериментальных данных;
2. Статистическая обработка полученных данных с определением степени полинома  $n$  и оценкой коэффициентов  $a_r$  модели (2) для каждой из рассматриваемых температур  $T_i$ ;
3. Нахождение функций  $a_r = g_r(T)$ .

На этапе получения экспериментальных данных диапазон давлений  $[P_{\min}, P_{\max}]$  равномерно разбивается на  $N_p$  поддиапазонов, а диапазон температур  $[T_{\min}, T_{\max}]$  – на  $N_{T_{\max}}$  поддиапазонов. Для каждого заданного значения температуры производится получение статической характеристики датчика  $u(T_i) = f(P, T_i)$ . После чего для каждого заданного значения давления осуществляется процедура измерения выборочного среднего значения выходного сигнала датчика  $\bar{y}_{ij}$  и дисперсии погрешностей измерения  $\sigma_{ij}^2$  в точке с координатами  $(P_j, T_i)$  по известным формулам [2].

На этапе статистической обработки экспериментальных данных проверяется гипотеза о равнозначности измерений, рассчитываются весовые коэффициенты в точках  $(P_j, T_i)$  и производится процедура аппроксимации экспериментальной зависимости полиномами, в качестве которых используются полиномы Чебышёва первого порядка. Поэтому зависимость (2) заменяется зависимостью:

$$u = h(P) = \sum_{r=0}^n b_r \cdot Q_r(P), \quad (3)$$

где  $Q_r(P)$  – полином Чебышёва степени  $r$ .

Методика аппроксимации экспериментальных зависимостей моделью (3):

1. Для каждого выбранного значения  $T_i$  ( $i = \overline{0, N_{T_{max}}}$ ) выполняется процедура построения полинома вида (3), определяются его степень  $n_i$  и коэффициенты  $b_{ri}$ .
2. Определяется максимальная степень  $n_{max}$  полученных полиномов.
3. Для значений  $T_i$ , для которых степень полинома  $n_i < n_{max}$ , строится полином степени  $n_{max}$  с помощью процедуры построения полинома.

Процедура построения полинома выполняется в предположении, что при конкретном заданном значении температуры  $T_i$  все значения осреднённого выходного сигнала датчика  $\bar{y}_{ij}$  ( $j = \overline{0, N_p}$ ) считаются равноточными, поэтому все измерения учитываются в дальнейших расчётах с одинаковыми весовыми коэффициентами  $w_{ij}$ . Для определённости будем их считать равными 1.

Ниже приводятся основные расчётные формулы в предположении, что степень полинома (3) выбрана равной  $n$ .

Оценки коэффициентов регрессии  $b_r$  находятся из соотношения:

$$\hat{\mathbf{b}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} (\mathbf{X}^T \bar{\mathbf{y}}), \quad (4)$$

где:  $\mathbf{b} = (b_0, b_1, \dots, b_n)^T$  – неизвестный вектор коэффициентов модели (3);  $\hat{\mathbf{b}}$  – оценка данного вектора;  $\bar{\mathbf{y}}$  – вектор осреднённых измерений выходного сигнала, компоненты которого равны  $\bar{y}_{ij} = \bar{y}(T_i, P_j)$  ( $j = \overline{0, N_p}$ );  $\mathbf{X}$  – матрица плана эксперимента размера  $(N_p+1) \times (n+1)$ :

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} Q_0(P_0) & Q_1(P_0) & \dots & Q_n(P_0) \\ Q_0(P_1) & Q_1(P_1) & \dots & Q_n(P_1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_0(P_{N_p}) & Q_1(P_{N_p}) & \dots & Q_n(P_{N_p}) \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$^T$  и  $^{-1}$  – операции транспонирования и нахождения обратной матрицы соответственно. Так как столбцы матрицы  $\mathbf{X}$  ортогональны, то матрица  $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})$  является диагональной, в диагонали которой стоят элементы:  $x_\mu = \sum_{m=0}^{N_p} Q_\mu^2(P_m)$ , ( $\mu=0, 1, \dots, n$ ).

Тогда обратная матрица  $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$  тоже будет диагональной с элементами в главной диагонали, равными  $1/x_\mu$ . Поэтому при увеличении степени полинома (3) на единицу нет необходимости пересчитывать матрицу  $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$ , а достаточно только увеличить её размеры на 1, при этом последний диагональный элемент будет равен  $1/x_{(n+1)}$ , что существенно упрощает все расчёты.

Остаточная дисперсия отклонения экспериментальных данных от кривой регрессии рассчитывается по формуле:

$$\sigma_r^2 = \frac{1}{N_p - n_i - 1} \left[ \sum_{j=0}^{N_p} \bar{y}_{ij}^2 - \sum_{r=0}^n \hat{b}_r \left( \sum_{j=0}^{N_p} \bar{y}_{ij} Q_r(P_j) \right) \right]. \quad (6)$$

Описание процедуры построения полинома:

1. При  $i=0$  выбирается начальный порядок полинома (3) равным  $n_i = 1$ :

$$\bar{y}_{ij} = b_0 + b_1 \cdot Q_1(P_j), (j = \overline{0, N_p})$$

2. Рассчитывается матрица плана эксперимента (5).
3. Рассчитываются оценки коэффициентов регрессии по формуле (4).
4. Вычисляется остаточная дисперсия по формуле (6).
5. Составляется F-отношение:  $F = M \cdot \sigma_r^2 / \sigma_{ij}^2$ .

6. Число  $F$  сравнивается со значением  $\gamma$  из таблицы распределения Фишера, соответствующим заданному уровню значимости  $q$  и числам степеней свободы, с которыми подсчитаны дисперсии (в нашем случае они равны:  $N_p - n_r - 1$  и  $M - 1$ ).

7. Если  $F \leq \gamma$ , то считается, что модель (3) адекватно описывает экспериментальные данные при температуре  $T_i$ , за оценки коэффициентов регрессии принимаются значения, полученные из (4). Далее осуществляется переход к следующему значению температуры  $T_{i+1}$ , для чего степень полинома (3) выбирается равной  $n$  – степени полинома на предыдущем шаге, и выполняется описанный цикл по пунктам 1°÷7°.

Если  $F > \gamma$ , то модель считается неадекватной. Необходимо увеличить порядок полинома (3) на единицу ( $n+1$ ) и повторить расчёты, начиная с п. 2°.

Зависимость каждого коэффициента  $b_r$  от температуры определяется в виде полиномиальной зависимости вида (7):

$$b_r = b_r(T) = \sum_{k=0}^K c_{kr} \cdot T^k, (r=0, 1, \dots, n_{max}), \quad (7)$$

где  $K$  – порядок модели;  $c_{\lambda}$  – коэффициенты регрессии, оценка которых вычисляется и впоследствии заносится в память микропроцессора интеллектуального датчика.

По снятому значению выходного сигнала датчика  $u$  и известной температуре  $T$  можно оценить значение входного давления  $P$ :

1. По известным коэффициентам  $c_{\lambda k}$  и температуре  $T$  рассчитываются значения коэффициентов характеристики датчика  $b_{\lambda}$  на основании выражений (7).

2. Рассчитывается нулевое приближение искомого давления для чего зависимость (2) линеаризуется:  $u = b_0 + b_1 \cdot P$ . Откуда:  $P_{(0)} = (u - b_0) / b_1$ .

3. Нулевое приближение уточняется по методу Ньютона [3], используя следующее рекуррентное соотношение:

$$P_{(l)} = P_{(l-1)} - h(P_{(l-1)}) / h'(P_{(l-1)}).$$

Итерации продолжаются, пока не будет достигнута требуемая точность.

Программно-аппаратный комплекс в целом позволил снизить трудоемкость технологических процессов контроля параметров и испытаний датчиков давления в нормальных и экстремальных климатических условиях, исключить влияние субъективного фактора за счет автоматизации операций подачи внешних воздействий и контроля выходных параметров; увеличить количество контролируемых параметров при регулировке и испытаниях выпускаемой продукции при одновременном сокращении ручного труда и повышении производительности техпроцесса в целом. Разработка программного обеспечения, реализующего предлагаемый метод, и его включение в состав автоматизированных систем позволит обеспечить температурную независимость работы интеллектуальных датчиков давления и повысить точность измерений, производимых с помощью этих датчиков.

#### Перечень ссылок

1. Прасолов В. В. Многочлены. – М.: МЦНМО, 2003. – 336 с.
2. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. – М.: ГИФМЛ, 1958. – 334 с.
3. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. – М.: Мир, 1985. – 509 с.