

Таким образом, можно сделать вывод, что предлагаемый метод оценки процессов АЭ обладает следующими преимуществами:

- позволяет вести постоянный и периодический контроль;
- повышает достоверность оценки ТС конструкции по сигналам АЭ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ермолов И.Н., Останин Ю.Я.* Методы и средства неразрушающего контроля качества. – М.: Высшая школа 1988. – 367 с.
2. *Муравин Г.Б., Лезвинская В.В., Шип В.В.* Акустическая эмиссия и критерии разрушения (Обзор) // Дефектоскопия. – 1993. - № 8. – С. 5-16.
3. *Расщепляев Ю.С., Попов А.В.* Оценка степени опасности дефектов на основе инвариантов при акустико-эмиссионном неразрушающем контроле. - Контроль. Диагностика, 2001, № 2. –С.29-32.
4. *Попов А.В.* Способ оценки процессов разрушения конструкций при акустико-эмиссионном контроле. Патент РФ № 2233444. Приоритет от 15.01.03.
5. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – М.: Наука, 1991. –380 с.
6. *Гайдышев И.* Анализ и обработка данных: Питер, 2001. – 752 с.: ил.
7. *Карасев А.И.* Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Статистика, 1970. – 343 с.

С.И. Клевцов

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ГРАДУИРОВОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

Несомненным преимуществом интеллектуальных датчиков физических величин является возможность реализации в них эффективных алгоритмов цифровой обработки данных. Цифровая обработка направлена на обеспечение высокой точности вычислений текущих значений одной или нескольких измеряемых переменных, учет влияния комплекса внешних факторов, расширение динамического диапазона измерений датчика за счет нелинейной части функции преобразования с сохранением высоких точностных характеристик.

Достижение низкой погрешности измерения физической величины в интеллектуальных датчиках давления базируется на использовании прецизионных моделей, их градуировочных характеристик, адаптированных к особенностям поведения функций преобразования чувствительных элементов (ЧЭ).

С одной стороны, для интеллектуального датчика давления необходимо построение линейной или нелинейной модели реальной градуировочной характеристики, которая бы повторяла ее пространственную форму в той степени, которая соответствует предъявляемым датчику требованиям к точности измерения физической величины.

С другой стороны, обеспечивающая необходимую точность модель градуировочной характеристики в случае отсутствия ограничений может быть достаточно ресурсоемкой, алгоритм ее реализации может быть громоздким с позиции сложности вычислений и, следовательно, трудно выполнимым аппаратными средствами интеллектуального датчика, который должен вести измерения физической величины в реальном времени.

Таким образом, в процессе формирования пространственной аппроксимации градуировочной характеристики интеллектуального датчика давления необходимо каждый раз выбирать компромиссное решение, обеспечивающее паритет между

требованием к точности измерений во всем диапазоне изменения давления и внешних воздействующих факторов и требованием к допустимому уровню сложности вычислений, определяемому в основном возможностями цифровой части датчика и динамическими характеристиками физического сигнала.

Наиболее простой моделью градуировочной характеристики датчика, широко используемой для градуировки аналогового датчика, является линейная аппроксимация [1]. Для ее построения используется метод наименьших квадратов.

В отличие от аналогового датчика, для которого необходима линеаризация градуировочной характеристики во всем диапазоне измеряемой физической величины и воздействующего фактора, например температуры, для интеллектуального датчика возможна аппроксимация в рамках поддиапазона значений.

Линейная аппроксимация в интеллектуальном датчике возможна при достаточно линейной функции преобразования чувствительного элемента и соответствующих требованиях к точности измерений. В работе [2] предложена линейная модель градуировочной характеристики, которая базируется на использовании метода кусочно-линейной аппроксимации. Количество идентификационных точек, используемых для аппроксимации, зависит от требуемой точности. Для обеспечения погрешности не выше 0,5 был выбран массив, содержащий 51 идентификационную точку поверхности $Z = f(P, T)$. Число калибровочных точек по оси P выбрано равным 17, а по оси T составляет три точки: $T_{мин}$, $T_{ср}$, $T_{макс}$. В качестве калибровочной ординаты выбран код Z 12-разрядного АЦП. Выбор точек массива и запись в память контроллера осуществляется на этапе калибровки датчика. Схема расчета давления состоит из нескольких шагов.

Вся поверхность Z разрезается на две поверхности: $Z1$ и $Z2$ по линии $T=T_{ср}$.

На основе измеренного значения температуры выбирается поверхность $Z1$ или $Z2$ и рассчитываются исходя из кусочно-линейного представления промежуточные значения кода АЦП для измеренной текущей температуры T по всему диапазону калибровочных давлений. В результате расчетов заполняется промежуточная таблица, где калибровочные значения кода АЦП Z приведены к измеренной текущей температуре T .

Далее, по кусочно-линейной зависимости в полученной плоскости (P, Z) рассчитывается значение текущего давления.

Использование предлагаемого метода, по утверждению авторов схемы, расчета позволило уменьшить погрешность, связанную с нелинейностью функции преобразования, с 5% до 0,05%, а температурную погрешность – с 2,5% до 0,1% (на 10⁰С) [2].

Несмотря на существенное снижение отдельных составляющих погрешности вычисления давления, следует отметить, что на диапазоне в 60⁰С изменений температуры (при проведении измерений в диапазоне температур -40⁰С ÷ +80⁰С и $T_{ср}=20^0$ С) только температурная составляющая погрешности может составить величину порядка 0,6%, что не позволяет рекомендовать данный метод для прецизионных вычислений. Тем не менее, его использование целесообразно и оправдано, когда к датчику не предъявляются повышенные требования по точности.

Дальнейшее повышение точности измерений связано с усложнением используемых при вычислениях базовых математических соотношений.

В настоящее время для аппроксимации градуировочной характеристики широко используются полиномы. Давление представляется полиномиальной функцией сигнала канала давления аналоговой части датчика:

$$P_m = \sum_{i=0}^n a_{im} U_m^i, \quad (1)$$

где P_m – давление при температуре T_m ;

U_m – выходной сигнал с чувствительного элемента датчика.

При этом коэффициенты полинома в свою очередь также полиномиальным способом зависят от сигнала, поступающего по каналу температуры датчика:

$$a_{im} = \sum_{k=0}^s \gamma_{ik} T_m^k, \quad (2)$$

где a_{im}, γ_{ik} – коэффициенты аппроксимации градуировочной характеристики.

Как правило [3, 4, 5, 6], используются полиномы второго порядка ($n=s=2$).

Таким образом, градуировочная характеристика представляет поверхность в пространстве $P \times U \times T$, коэффициенты аппроксимации a_{im} зависят только от температуры T_m , а γ_{ik} – не зависят от температуры и являются постоянными величинами для заданного экземпляра датчика.

Выражение (1) учитывает нелинейность градуировочной характеристики при фиксированном T_m , а выражение (2) характеризует нелинейность градуировочной характеристики при изменении температуры.

Важная особенность модели заключается в том, что формируется единое представление для всего диапазона измеряемой физической величины и внешнего воздействующего фактора, определяется один набор коэффициентов аппроксимации. Такой подход упрощает вычисления и обеспечивает достаточно высокую точность вычислений.

Так, например, как показано в [3], компенсация характеристик пьезорезисторного кремниевого сенсора давления с использованием микроконтроллерной системы для аппроксимации обратной функции передачи сенсора полиномом второго порядка по давлению и температуре позволила снизить максимальную погрешность измерения по отношению к характеристике сенсора в идеальном случае до $\pm 0,2\%$, а в температурном диапазоне от 0 до 70°C – до значений менее $\pm 0,1\%$. Температурная зависимость напряжения смещения нуля при этом находится в границах $\pm 0,2\%$ полного диапазона. Температурная компенсация уменьшила температурную зависимость чувствительности в 3,16 раза по отношению к некомпенсированному сенсору, чувствительность увеличилась 1,65 раза, максимальная нелинейность характеристики уменьшена в 26 раз.

Однако следует отметить, что указанный результат был достигнут при использовании довольно значительного массива исходных данных. При формировании градуировочной характеристики измерение давления в диапазоне 0-2.0 бар выполнялось с шагом 0.004 бар, а температуры от -30 до $+70^\circ\text{C}$ с шагом 5°C .

В работе [5] показано, что основной вклад в погрешность вычисления измеряемой физической величины (давления) вносят погрешности измерения сигналов, снимаемых с каналов давления и температуры аналоговой части датчика. Погрешность, вносимая составляющей, определяемой неточностью вычисления коэффициентов аппроксимации градуировочной характеристики, практически не зависит от внешних условий.

Дальнейшее уменьшение методической погрешности определения давления связано с повышением точности аппроксимации градуировочной характеристики, что в рамках модели, рассматриваемой в [3, 4, 5, 6], требует использования полиномов высокой степени. Усложнение математических выражений приводит к громоздким алгоритмам и значительным трудностям в реализации.

Задача достижения прецизионной точности измерения значения физической величины в интеллектуальном датчике может быть решена при использовании предложенной в [7, 8, 9] мультисегментной модели градуировочной характеристики с линейными или нелинейными пространственными элементами.

В рамках предлагаемой модели реальная градуировочная кривая заменяется системой локальных поверхностей так, чтобы они в совокупности повторяли ее пространственную конфигурацию. Тип аппроксимирующей локальной поверхности определяется многими факторами, одними из наиболее значимых являются требуемые точностные характеристики, объем и полнота исходных данных.

С позиций простоты и скорости вычислений, что важно при работе датчика в реальном времени, предпочтение следует отдать модели локальной поверхности в виде плоскости. Аппроксимация градуировочной характеристики посредством ее представления в виде системы плоскостей в пространстве измеряемых параметров позволяет предельно упростить вычисления в микроконтроллере, а также обеспечивает управление методической погрешностью.

Исходной информацией для построения градуировочной характеристики являются массивы градуировочных данных канала давления и канала внешнего фактора (температура), полученные при испытаниях датчика в требуемых диапазонах изменения давления и температуры.

Таким образом, имеется множество экспериментальных значений

$$\{P_j, U_{P_j}, U_{T_j}\}_{j=1}^n,$$

где $U_{P_j}, U_{T_j} - j$ -е значения сигналов, полученных соответственно с каналов давления и температуры при установлении эталонных значений P_j и температуры T_j на испытательном стенде.

Аппроксимация градуировочной характеристики базируется на модели элементарной плоскости в виде

$$P = A + B_1 U_P + B_2 U_T.$$

Расчет коэффициентов аппроксимации осуществляется с использованием метода наименьших квадратов.

В результате для каждой подобласти Π_i области допустимых экспериментальных значений $\Pi = \Pi_P \cup \Pi_T$, где $\Pi_P = [U_{P_{min}}, U_{P_{max}}]$, $\Pi_T = [U_{T_{min}}, U_{T_{max}}]$, получим коэффициенты A_i , B_{1i} и B_{2i} , определяющие плоскость $P_i = A_i + B_{1i} U_P + B_{2i} U_T$ в пространстве $P \times U_P \times U_T$.

Градуировочная характеристика датчика в виде пространственной системы плоскостей может быть построена несколькими способами. В работе [7] предложен способ построения на основе системы взаимно пересекающихся пространственных прямых.

Построенная система плоскостей является пространственной аппроксимацией реальной градуировочной характеристики интеллектуального датчика давления.

Исследование возможностей пространственной плоскостной модели градуировочной характеристики проводилось с использованием данных испытаний перспективного датчика давления, имеющего в своем составе первичный преобразователь давления (канал давления) и первичный преобразователь температуры (канал температуры). Эталонные давление и температура, подаваемые на датчик при его испытаниях, находились в пределах $0 - 80 \text{ кгс/см}^2$ и $-4^{\circ}\text{C} - +35^{\circ}\text{C}$ ($269 \text{ K} - 308 \text{ K}$) соответственно.

Для канала давления предельная величина абсолютной погрешности исходных данных составляла $0,12 \text{ мВ}$, относительная погрешность – не выше $0,05\%$.

Кроме того, график $P = P(U_P)$ имеет небольшую нелинейность (выпуклость), которую можно оценить в $2,1\%$ во всем диапазоне изменения P .

Абсолютная погрешность определения давления при использовании пространственной характеристики в виде системы плоскостей не превышает $0,014$

кгс/см² при диапазоне значений входного сигнала давления от 0 кгс/см² до 80кгс/см². Максимальное значение относительной погрешности вычисления давления равно порядка 0,076% во всем диапазоне значений входного сигнала давления и температуры. С увеличением измеряемого сигнала давления относительная ошибка снижается.

Представленный подход принципиально может быть использован в случае значительно большей нелинейности функции преобразования датчика. Однако задача достижения высокой точности вычислений потребует большего объема испытаний, что может оказаться неэффективным, поскольку, например, быстрый рост количества аппроксимирующих плоскостей влияет на сложность и скорость вычислений, влечет за собой увеличение объема хранимой информации.

Выходом из этой ситуации является использование для построения модели градуировочной характеристики в пространстве измеряемых параметров $P \times U \times T$ локальных поверхностей с заданной нелинейностью [8, 9, 10].

Исходной информацией для анализа эффективности этой модели градуировочной характеристики являлись массивы градуировочных данных канала давления и канала температуры, полученные при испытаниях 2-х ЧЭ в диапазонах изменения температуры -40°C - $+80^{\circ}\text{C}$ и давления 0-10 кгс/см² (0 – 980 кПа) для ЧЭ №1, 0-60 кгс/см² (0 – 5880 кПа) для ЧЭ №2.

Представленные данные испытаний характеризуются нелинейностью приблизительно 3,7% - 5,2% при разных фиксированных значениях температуры. Нелинейность наблюдается на начальном и конечном участках диапазона изменения давления. Кроме того, реальная градуировочная характеристика каждого ЧЭ представляет поверхность в системе параметров $P \times U_p \times U_T$, которая имеет особенность: нижняя и верхняя части поверхности (по оси давления) повернуты друг относительно друга с условной линией раздела, например для ЧЭ №1 при $P \sim 360\text{-}380$ кПа. Это обстоятельство указывает на существенную нелинейность градуировочной характеристики в пространстве параметров $P \times U_p \times U_T$.

Рассматривались подобласти следующих размеров:

для ЧЭ №1 – 1 вариант (1 кгс/см² \times 20⁰С), 2 вариант (2 кгс/см² \times 40⁰С), 3 вариант (3 кгс/см² \times 60⁰С), 4 вариант (4 кгс/см² \times 60⁰С);

для ЧЭ №2 – 1 вариант (6 кгс/см² \times 20⁰С), 2 вариант (12 кгс/см² \times 40⁰С), 3 вариант (16 кгс/см² \times 60⁰С), 4 вариант (24 кгс/см² \times 60⁰С), где первое число обозначает размер подобласти по давлению ΔP , а второе число – по температуре ΔT .

В целях определения эффективности модели в качестве пространственных элементов рассматривались нелинейный и линейный пространственные элементы, определяемые выражениями (1), (2) при $n=s=2$ и $n=s=1$ соответственно.

Наименьшая из подобластей рассматривалась только для линейного элемента, поскольку для реализации нелинейной модели необходим больший объем данных испытаний.

Анализ показывает, что с точки зрения аппроксимации наиболее проблематичными зонами области определения градуировочной характеристики являются зоны, примыкающие к граничным значениям температуры и давления ($T=-40^{\circ}\text{C}$, $T=80^{\circ}\text{C}$, $P=0\text{кгс/см}^2$, $P=P_{\text{max}}$ от диапазона), а также зона, соответствующая $T=0^{\circ}\text{C}$ – 25°C . Погрешности градуировки в этих зонах в основном больше, чем в других, независимо от того, линейная или нелинейная модель используется для аппроксимации.

На приведенных ниже графиках представлены в интегрированном виде результаты испытаний линейной и нелинейной моделей для различных подобластей изменения давления и температуры.

На рис. 1, 2 представлены графики относительной погрешности аппроксимации градуировочной характеристики ЧЭ №1 с использованием линейной (ЛМ) и нелинейной (НМ) моделей при температурах $T=-40^{\circ}\text{C}$ и $T=80^{\circ}\text{C}$ для различных размеров подобластей изменения давления.

На рисунках графики идентифицируются с помощью набора символов вида XX-Ц, где первые два символа обозначают тип модели, а цифра после дефиса – вариант размера подобласти.

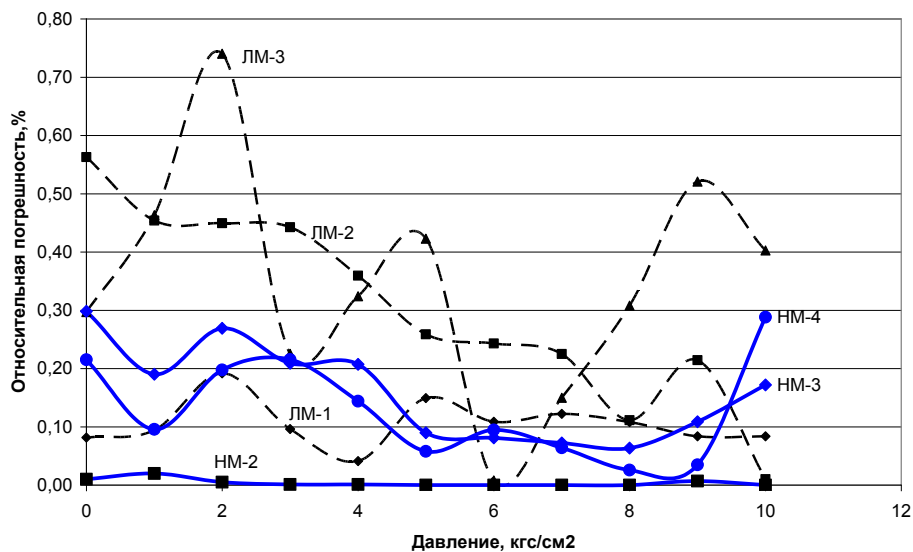


Рис. 1. График относительной погрешности аппроксимации градуировочной характеристики ЧЭ №1 при $T= -40^{\circ}\text{C}$ (пунктир – линейная модель; сплошная – нелинейная модель)

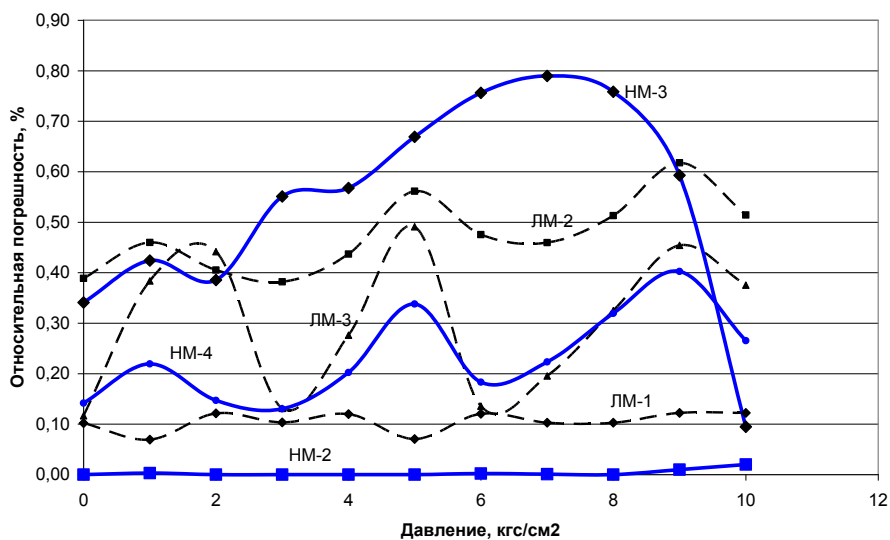


Рис. 2. График относительной погрешности аппроксимации градуировочной характеристики ЧЭ №1 при $T= 80^{\circ}\text{C}$ (пунктир – линейная модель; сплошная – нелинейная модель)

На рис. 3, 4 представлены аналогичные графики относительной погрешности аппроксимации градуировочной характеристики для ЧЭ №2.

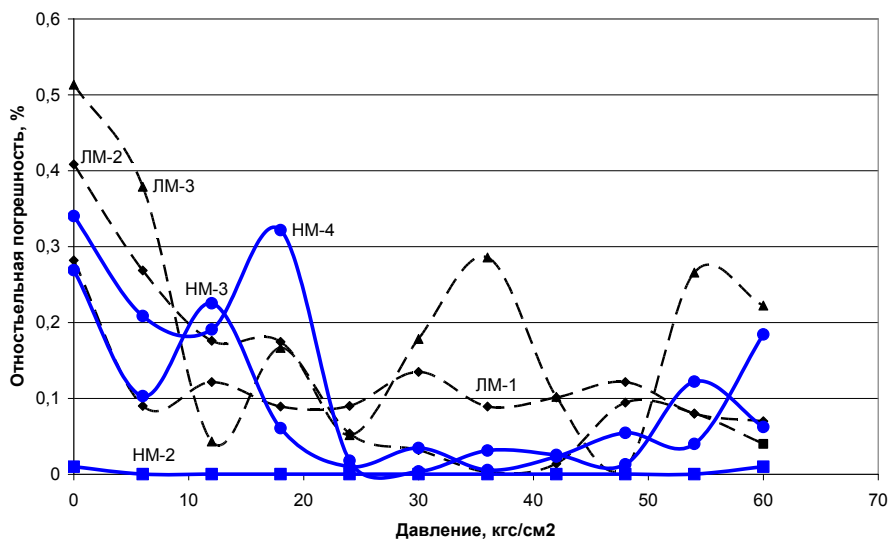


Рис. 3. График относительной погрешности аппроксимации градуировочной характеристики ЧЭ №2 при $T = -40^{\circ}\text{C}$ (пунктир - линейная модель; сплошная - нелинейная модель)

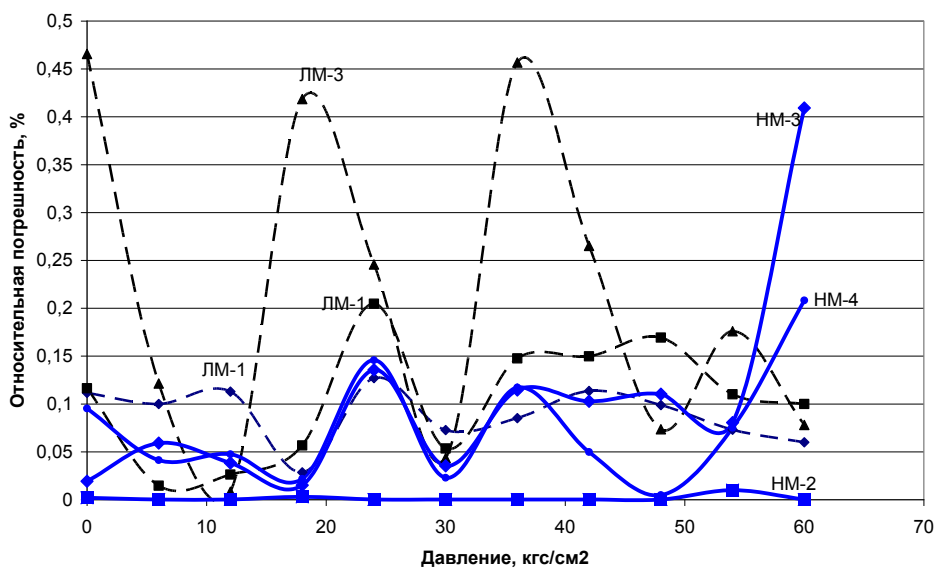


Рис. 4. График относительной погрешности аппроксимации градуировочной характеристики ЧЭ №2 при $T = 80^{\circ}\text{C}$ (пунктир - линейная модель; сплошная - нелинейная модель)

Анализ испытаний линейной и нелинейной моделей аппроксимации градуировочных характеристик показывает, что наилучшие результаты получены в случае использования **нелинейной модели** при делении области определения градуи-

ровочной характеристики на подобласти размером ($12 \text{ кгс/см}^2 \times 40^\circ\text{C}$) для ЧЭ №2 и ($2 \text{ кгс/см}^2 \times 40^\circ\text{C}$) для ЧЭ № 1 и случае использования *линейной модели* при делении области определения градуировочной характеристики на подобласти размером ($6 \text{ кгс/см}^2 \times 20^\circ\text{C}$) для ЧЭ №2 и ($1 \text{ кгс/см}^2 \times 20^\circ\text{C}$) для ЧЭ № 1.

Нелинейную модель не удалось протестировать на малых по размерам подобластях, на которых была испытана линейная модель, поскольку на момент моделирования необходимые для этого данные отсутствовали.

По результатам испытаний по критерию минимальной относительной погрешности в заданном диапазоне изменения давления и температуры для аппроксимации градуировочной характеристики датчика абсолютного давления выбрана нелинейная модель.

Относительная погрешность аппроксимации градуировочной характеристики с использованием нелинейной модели пространственного элемента на подобласти размером ($2 \text{ кгс/см}^2 \times 40^\circ\text{C}$) для ЧЭ № 1 не выше 0,03% в диапазоне изменения давления от 0 кгс/см^2 до 10 кгс/см^2 и температур от -40°C до 80°C , для ЧЭ № 2 не выше 0,01% на подобласти размером ($12 \text{ кгс/см}^2 \times 40^\circ\text{C}$) в диапазоне изменения давления от 0 кгс/см^2 до 60 кгс/см^2 .

Максимальное значение относительной погрешности аппроксимации градуировочной характеристики с использованием линейной модели пространственного элемента на подобласти размером ($1 \text{ кгс/см}^2 \times 20^\circ\text{C}$) для ЧЭ № 1 составляет 0,2% в диапазоне изменения давления от 0 кгс/см^2 до 10 кгс/см^2 и температур от -40°C до 80°C , для ЧЭ № 2 – 0,14% на подобласти размером ($6 \text{ кгс/см}^2 \times 20^\circ\text{C}$) в диапазоне изменения давления от 0 кгс/см^2 до 60 кгс/см^2 .

Сравнение результатов показывает преимущества использования нелинейных пространственных элементов для реализации прецизионной обработки измеряемых физических величин в интеллектуальных датчиках.

Анализ результатов показывает, что модель аппроксимации градуировочной характеристики системой локальных пространственных элементов обеспечивает высокую точность вычисления значений физической переменной во всем диапазоне воздействующих факторов при произвольной нелинейности данных градуировочных испытаний датчика. При незначительной нелинейности эффективна аппроксимация локальными плоскостными элементами.

Таким образом, представленный подход к построению градуировочных характеристик может быть использован для разработки эффективных высокоточных микропроцессорных алгоритмов интеллектуальных датчиков-измерителей физических переменных, а также для создания интеллектуальных микропроцессорных систем градуировки чувствительных элементов в процессе проведения их испытаний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семенов Л.А., Сирая Т.Н. Методы построения градуировочных характеристик средств измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1986.
2. Бобровников Н.Р., Яркин С.В., Гридин Ю.Н., Стрыгин В.Д., Чертов Е.Д. Математическое обеспечение микропроцессорных преобразователей аналоговых пневматических сигналов //Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2002. – №2. – С.36-39.
3. Шапонич Д., Жигич А. Коррекция пьезорезистивного датчика давления с использованием микроконтроллера //Приборы и техника эксперимента. - 2001. - №1. – С. 54–60.

4. *Слива Е.* Коррекция по температуре измерительных преобразователей физических величин на базе микроконтроллера MSP430F149 фирмы Texas Instruments. // Средства связи №2(15) – ИНФОРМОСТ. –2001 (www.informost.ru)
5. *Клевцов С.И., Линьков В.С., Веретельников Ю.А., Кузьминов В.Г.* Погрешности вычисления давления в интеллектуальном датчике при матрично-полиномиальной аппроксимации его градуировочной характеристики // Известия ТРТУ. 2004. №2. – С.30-48.
6. *Клевцов С.И.* Матрично-полиномиальная аппроксимация градуировочной характеристики датчика давления // Материалы международной научной конференции "Системный подход в науках о природе, человеке и технике". Ч.5. – Таганрог: ТРТУ, 2003. – С.16-25
7. *Клевцов С.И.* Пространственно-полиномиальные модели аппроксимации градуировочной характеристики интеллектуального датчика // Труды международных научно-технических конференций "Интеллектуальные системы" (IEEE AIS'04) и "Интеллектуальные САПР" (САД-2004). Научные издания в 3-х томах. М.: Изд-во физико-математической литературы, 2004. Т.2. 468с. – С.309-314.
8. *Клевцов С.И., Удод Е.В.* Пространственная плоскостная модель градуировочной характеристики интеллектуального датчика давления // Известия ТРТУ. 2005. №1. – С.99-107.
9. *Клевцов С.И., Клевцова А.Б.* Мульти сегментная пространственная модель градуировочной характеристики интеллектуального датчика // Материалы международной научной конференции "Цифровые методы и технологии". Ч.4. – Таганрог: Изд-во "Антон", ТРТУ, 2005. – С.21-26.
10. *Клевцов С.И., Удод Е.В.* Компьютерное моделирование решения задач компенсации составляющих систематической погрешности датчика давления в целочисленной арифметике // Известия ТРТУ. 2006. №5. – С.103-109.

А.Б.Клевцова

КАЧЕСТВЕННАЯ ЭКСПЕРТНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОСТАВЛЕННОЙ ЦЕЛИ

Степень соответствия процесса моделирования поставленной цели характеризуется состоянием функционала $W=W(h_1, h_2, \dots, h_i) \quad i \in I$. Состояние W оценивается с помощью комплексного критерия K . Реализуемость цели на каждом этапе моделирования определяется через соответствие интегральной функции комплексному критерию K .

Интегральную функцию взаимодействия $W=W(h_1, h_2, \dots, h_i)$ можно представить как соотношение, зависящее от функций влияния объектов $h_i \in H\{h_i\}, \quad i \in I$. Форма функции W определяет свойства критерия K и зависит от вида и характера решаемой задачи.

Выделим два вида целей и определим соответствующие им интегральные функции взаимодействия W и критерии K .

К первому виду целей отнесем цели, достижение которых определяется качественным способом, без определения степени реализации. В этом случае все результаты, приводящие к достижению цели или препятствующие этому, считаются одинаково весомыми.

При этом критерий должен принимать только два значения: 1 (в случае успеха) и 0 (в противоположном случае).

В случае качественной цели ее определение может предшествовать формированию критерия.