

## Линеаризация градуировочных характеристик емкостных датчиков давления

С. Ф. ГОРБУНОВ, Б. В. ЦЫПИН

Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия,  
e-mail: niifi@sura.ru

*Рассмотрены нелинейность градуировочных характеристик емкостных датчиков давления и их аппроксимация различными аналитическими функциями. Оценены полученные погрешности аппроксимации. Предложены способ и алгоритм цифровой линеаризации градуировочной характеристики датчика с использованием кубического сплайна.*

**Ключевые слова:** емкостный датчик, аппроксимация, градуировочная характеристика, нелинейность, сплайн.

*The capacitive pressure sensors calibration characteristics nonlinearity and their approximation by various analytical functions are considered. The approximation errors are estimated. The method and algorithm of the sensor calibration characteristics digital linearization with use of cubic spline is suggested.*

**Key words:** capacitive sensor, approximation, calibration characteristic, nonlinearity, spline.

При измерениях давления в различных областях техники наиболее часто применяют мостовые тензорезистивные и полупроводниковые датчики с различными типами выходных сигналов и схемами преобразования вторичных преобразователей. Это, в первую очередь, связано с простотой обработки измерительного сигнала мостовых тензорезистивных первичных преобразователей (ПП) и разнообразием достаточно хорошо отработанных схемных решений вторичных преобразователей для них. Немаловажную роль также играет низкая стоимость мостовых датчиков.

Существенными недостатками указанных датчиков являются старение материала, разница в упругих свойствах тензорезистора и клея, которым его приклеивают к мембране датчика, и ограниченный рабочий температурный диапазон. В результате со временем градуировочная характеристика датчика изменяется, что приводит к дополнительной погрешности измерения давления.

Эти недостатки в значительной степени устранены в емкостных ПП, которые благодаря особенностям конструкции можно использовать при температурах от  $-196$  до  $+300$  °С. Они имеют также значительно лучшую долговременную стабильность градуировочной характеристики и могут быть использованы в жестких условиях эксплуатации (в том числе и при воздействии ионизирующего излучения) [1].

Основным недостатком емкостных ПП является более сложное преобразование значения емкости в другую промежуточную электрическую величину, поддающуюся прямому измерению или преобразованию. Кроме того, значение рабочей емкости и ее изменение, как правило, не превышают 10 пФ, что создает трудности при разработке схем преобразования и ограничивает возможность подключения ПП к вторичному преобразователю через длинную кабельную перемычку.

Номинальная градуировочная характеристика емкостного ПП давления имеет ярко выраженную нелинейность, которая в значительной степени определяется изменением значения рабочей емкости и представляет собой обратно

пропорциональную зависимость: чем меньше изменение емкости, тем более линейна градуировочная характеристика. Например, для емкостного ПП, состоящего из одной рабочей измерительной емкости  $C_x$ , нелинейность составляет порядка 11 % для начального значения емкости  $C_{x0} = 10$  пФ и ее изменения  $\Delta C_x = 2,5$  пФ и 22 % для  $\Delta C_{x0} = 12,5$  пФ и  $\Delta C_x = 7,7$  пФ в рабочем диапазоне изменения давления.

Нелинейность характеристики индивидуальна для каждого ПП из-за технологического разброса его параметров, в том числе чувствительности значения рабочей емкости к измеряемому давлению.

Ранее разработанные принципы линеаризации статической функции преобразования емкостных датчиков основаны на свойствах относительных или логометрических преобразований типа  $C_0/C_x$ ,  $(C_x - C_0)/C_x$  для квазидифференциальных датчиков либо  $(C_{x1} - C_{x2}) / (C_{x1} + C_{x2})$  — для дифференциальных [2]. Эффективность такой линеаризации определяется в основном возможностями технологии изготовления чувствительного элемента емкостного ПП, так как напрямую зависит от одинаковости геометрических размеров рабочей ( $C_x$ ,  $C_{x1}$ ,  $C_{x2}$ ) и опорной ( $C_0$ ) емкостей. Схемотехническая реализация подобных относительных преобразований достаточно громоздка и сложна, является источником дополнительных погрешностей и снижает общую точность датчика.

Современный подход к разработке прецизионных датчиков давления и мировые тенденции развития в данной области привели к реализации цифрового емкостного датчика, в котором все преобразование, включая преобразование емкости и дальнейшие операции с измерительной информацией, осуществляются в цифровом виде в микроконтроллере, встроенном в датчик (рис. 1).

Преобразование емкости в код производится прецизионным 24-разрядным преобразователем «емкость—код» ПЕК, основанным на сигма—дельта-модуляции. Считывание результата преобразования из ПЕК осуществляется по цифровому интерфейсу I2C микроконтроллером МК, в кото-

ром затем происходят цифровая фильтрация результата преобразования, линеаризация, коррекция температурной погрешности и нормирование кода выходного сигнала, передаваемого по цифровому выходному интерфейсу SPI.

Задача линеаризации градуировочной характеристики датчиков цифровыми методами обработки измерительной информации фактически сводится к оптимальной аппроксимации реальной статической функции преобразования датчика как функции измеряемого воздействия.

В ходе анализа полученных градуировочных характеристик датчиков для 11 градуированных точек в виде  $N_{\text{вых}} = f(N_{\text{ПЭК}})$  (рис. 2) была проведена оценка наилучшей аппроксимации по критерию минимума ее погрешности. Рассматривали аппроксимации гиперболической, логарифмической и полиномиальной функциями.

Наименьшую погрешность обеспечивает аппроксимация полиномами 3—5-й степеней — не более 0,1 % в узлах интерполяции. Использование полиномов более высоких степеней нецелесообразно, так как они в некоторых случаях не только не уменьшают погрешность аппроксимации, но и могут дать еще большие погрешности в промежуточных точках интервалов разбиения  $[N_i; N_{i+1}]$ , особенно ближе к краям области определения  $[N_0; N_{11}]$  полинома.

Погрешность аппроксимации при ее оценке вычисляли как максимальное отклонение аппроксимирующей функции  $A(N_{\text{ПЭК}})$  от номинальной идеально линейной градуировочной характеристики  $H(N_{\text{ПЭК}})$  датчика в заданной градуированной точке  $N_{\text{ПЭК}i} = f(p_i)$ , где  $p_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 11$ ) — заданное значение давления при градуировке ПП. Полученные результаты для различных аппроксимирующих функций представлены в таблице.

Аппроксимация полиномом не создает непрерывность производных аналитически описанной функции и может давать значительные погрешности в промежутках между узлами. Кроме того, она плохо приспособлена для экстраполяции и, как правило, не обеспечивает правильное асимптотическое поведение аппроксимирующей функции при изменении ее аргумента за пределами интервала интерполяции  $[N_0; N_{11}]$ .

От этих недостатков свободна аппроксимация при помощи сплайн-функций. Сплайн-функцию можно наглядно представить как линию, которую образует гибкая линейка, будучи закрепленной в ряде точек — узлах интерполяции. Математический сплайн — специальный многочлен  $A(x)$ , принимающий в узлах значения  $A(x) = y(x_i)$  и обеспечивающий в них непрерывность производных. Обычно достаточно создать непрерывность первой и второй производных, для чего достаточно использовать сплайн-многочлены третьего порядка (кубические сплайны) [3].

Аналитическое выражение, описывающее кубическим сплайном экспериментально полученные данные по исходной градуировочной характеристике датчика (см. рис. 2), имеет вид

$$N_{\text{вых}} = C_{i,3} + (N_{\text{ПЭК}} - N_i) C_{i,2} + (N_{\text{ПЭК}} - N_i)^2 C_{i,1} + (N_{\text{ПЭК}} - N_i)^3 C_{i,0}, \quad (1)$$

где  $N_{\text{вых}}$  — выходной линеаризованный цифровой код датчика, прямо пропорциональный измеряемому давлению  $p$ ;  $N_{\text{ПЭК}}$  — выходной цифровой код преобразователя «емкость—код» (в общем случае нелинейный измеряемому давлению);

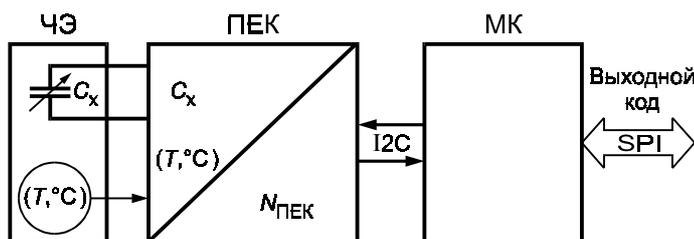


Рис. 1. Структурная схема емкостного датчика давления:

ЧЭ — чувствительный элемент; ПЭК — преобразователь «емкость — код»; МК — микроконтроллер; I2C, SPI — цифровые последовательные интерфейсы

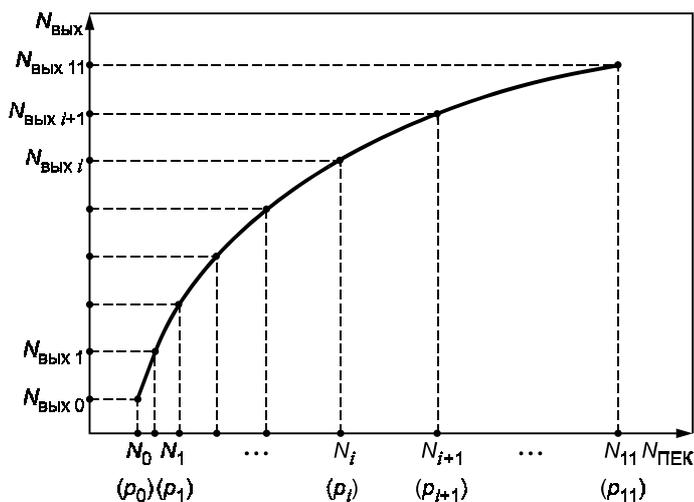


Рис. 2. Градуировочная характеристика емкостного датчика давления:

$N_{\text{вых}}$  — выходной код датчика, прямо пропорциональный измеряемому давлению  $p$ ;  $N_{\text{ПЭК}}$  — выходной код ПЭК, эквивалентный измеряемой емкости первичного преобразователя

лению);  $N_i$  ( $i = 0, \dots, 10$ ) — узловая точка сплайна — значение кода  $N_{\text{ПЭК}}$ , соответствующее заданному значению измеряемого давления  $p_i$ ; на интервале аппроксимации  $[N_i; N_{i+1}]$ ;  $C_{i,j}$  ( $i = 0, \dots, 10, j = 0, \dots, 3$ ) — коэффициенты сплайна, однозначно определяющие функцию аппроксимации на участке  $[N_i; N_{i+1}]$ .

Процедура расчета коэффициентов сплайна для всей области определения рабочей характеристики велась с использованием средств Mathcad и Matlab.

Для характеристики, состоящей из 11 узловых точек (т. е. десяти участков аппроксимации), описание сплайном включает 40 индивидуальных коэффициентов  $C_{i,j}$ . При этом для заданных значений узлов интерполяции кубический

**Зависимость погрешности аппроксимации от вида аппроксимирующей функции**

Характеристика датчика	Погрешность аппроксимации, %, для аппроксимирующей функции					
	чувствительность $\Delta C_x$ , пФ	нелинейность, %	гиперболической $(y = a/x + b)$	логарифмической $(y = a \ln x + b)$	полиномиальной $(y = a_0 + a_1x + \dots + a_n x^n)$	
$n = 3$					$n = 4$	$n = 5$
2,47	11,27	21	8,3	0,16	0,04	0,04
5,26	17,01	18	4,8	0,46	0,10	0,02
7,70	22,23	15	2,6	0,46	0,08	0,03

сплайн единственен. Одним из свойств кубического сплайна является зависимость всех его коэффициентов  $C_{i,j}$  от любого значения узловой точки, т. е. при изменении хотя бы одного значения узловой точки  $N_i$  полностью меняются значения всех коэффициентов  $C_{i,j}$ , в том числе описывающих другие интервалы интерполяции, входящие в область определения данного сплайна [4].

Цифровая линеаризация градуировочной характеристики проводится по следующей методике. Полученной в ходе градуировки датчика характеристике вида  $N_{\text{ПЭК } i} = f(p_i)$  ставится в соответствие обратная ей характеристика вида  $N_{\text{ВЫХ } i} = f(N_{\text{ПЭК } i})$ , причем значения  $N_{\text{ВЫХ } i}$  рассчитываются так, чтобы они были идеально линейны в зависимости от значений  $p_i$ .

Таким образом, характеристика  $N_{\text{ВЫХ}} = f(N_{\text{ПЭК}})$  получается простой заменой аргумента  $p$  на соответствующий ему образ  $N_{\text{ВЫХ}}$  и рассматривается обратная функциональная зависимость для получения линейной зависимости выходного кода  $N_{\text{ВЫХ}}$  от давления  $p$ , которая и является объектом аппроксимации.

Аппроксимация экспериментально полученной функции  $N_{\text{ВЫХ}} = f(N_{\text{ПЭК}}) = f(p)$  в виде двумерной матрицы коэффициентов сплайна записывается в ПЗУ микроконтроллера каждого датчика.

Зависимости  $N_{\text{ВЫХ}} = f(N_{\text{ПЭК}})$  так же, как и коэффициенты сплайна, индивидуальны для каждого датчика и рассчитываются отдельно, благодаря чему достигается высокая точность аппроксимации за счет учета индивидуальных особенностей градуировочной характеристики.

В ходе работы датчика выходной код  $N_{\text{ПЭК}}$  преобразователя «емкость—код» считывается микропроцессором, подставляется в выражение (1) и в результате вычисляется выходной код датчика  $N_{\text{ВЫХ}}$ , имеющий линейную зависимость от измеряемого давления  $p$ .

Аппроксимация кубическим сплайном показала хорошие результаты в узловых точках аппроксимации и не превышала  $10^{-12}$ — $10^{-14}$  % идеальной характеристики  $N_{\text{ВЫХ}} = f(N_{\text{ПЭК}})$ . Свойство кубического сплайна всегда сходиться к интерполируемой непрерывной функции позволяет с достаточной и необходимой точностью аппроксимировать множество градуировочных характеристик однотипных датчиков, используя для них одно и то же число узлов интерполяции и один и тот же шаг. Это дало возможность существенно уменьшить число узловых точек аппроксимации, необходимых для точного описания реальной характеристики любого датчика данного типа.

Среди недостатков выбранного метода можно выделить большое количество коэффициентов, входящих в аналитическое выражение функции аппроксимации, специфичность реализации алгоритма на микропрограммном уровне в микропроцессоре.

В результате применения аппроксимации кубическим сплайном были получены датчики избыточного давления с основной погрешностью 0,1 % (в том числе учитывалась погрешность от механического гистерезиса емкостного чувствительного элемента, которая в данной реализации датчика не корректировалась).

Для проведения градуировки измеряемое давление задавалось при помощи грузопоршневого манометра МП-600, класса точности 0,05. При этом градуируемые датчики давления имеют предел измерения избыточного давления 49,05 МПа. Ввиду того, что градуировочное оборудование не позволяет аттестовывать датчики давления класса точности выше 0,05, потенциальная точность полученных датчиков давления, разработанных с использованием цифровой сплайн-аппроксимации их градуировочных характеристик, будет ограничена точностью градуировочного оборудования. Для аттестации датчиков более высокого класса точности необходимо градуировочное оборудование класса точности выше 0,05.

Данный способ линеаризации статической индивидуальной функции преобразования датчика отличается простотой схемотехнического решения по сравнению с традиционными аналоговыми способами, чрезвычайной экономичностью (благодаря возможности программно изменять характеристики датчика, а не проводить схемотехническую коррекцию), оперативностью и точностью, не предъявляет высоких требований к точности конструктивных элементов ПП. Использование сплайн-аппроксимации позволило существенно снизить погрешность интерполяции по сравнению с другими аппроксимирующими функциями и тем самым уменьшить основную погрешность датчика в целом.

Рассмотренный способ линеаризации применим и к другим типам датчиков (тензорезистивным, индуктивным и т. д.) с нелинейными градуировочными характеристиками. При этом определяющими факторами в обеспечении высокой точности датчика будут стабильность (повторяемость) градуировочной характеристики ПП датчика и класс точности градуировочного оборудования.

#### Л и т е р а т у р а

1. Лебедев Д. В. // Датчики и системы. 2007. № 6. С. 25.
2. Арбузов В. П. Структурные методы повышения точности измерительных цепей емкостных и индуктивных датчиков: монография. Пенза: ИИЦ ПГУ, 2008.
3. Дьяконов В. П. Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ. М.: Наука, 1989.
4. Завьялов Ю. С. и др. Методы сплайн-функций. М.: Наука, 1980.

Дата принятия 28.07.2010 г.