

МЕТОДЫ КОРРЕКЦИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ РЕЗОНАТОРНЫХ ДАТЧИКОВ

А. И. ЮРИН, Е. А. КАРЦЕВ, А. В. ДМИТРИЕВ

Московский институт электроники и математики национального
исследовательского университета «Высшая школа экономики»,
Москва, Россия, e-mail: ayurin.@hse.ru

Рассмотрены принцип работы, достоинства и недостатки резонаторных датчиков. Предложен метод коррекции дополнительных погрешностей резонаторных датчиков. Проведено экспериментальное исследование предложенного метода на струнных резонаторных датчиках линейных перемещений.

Ключевые слова: датчик, резонатор, коррекция погрешностей.

Considered the principle of operation, advantages and disadvantages of resonator sensors. Proposed a method of correction of complementary errors of resonator sensors. An experimental research of the proposed method on the string resonator sensors of linear displacements.

Key words: sensor, resonator, temperature error, the correction of errors.

На современном этапе развития измерительной техники точность измерений частоты электрических сигналов является одной из наивысших, поэтому метрологические характеристики частотных датчиков (выходная величина — частота) отличаются от характеристик датчиков с амплитудно-модулированным выходным сигналом. Кроме того, при использовании частотно-модулированного сигнала существенно упрощены требования к линиям связи в отношении стабильности сопротивлений и паразитных ЭДС, так как помехоустойчивость такого сигнала значительно выше, чем амплитудно-модулированного [1].

Наиболее распространенными частотными датчиками являются резонаторные, основной элемент которых — колебательная система (резонатор) с перестраиваемой под влиянием измеряемой величины собственной частотой, служащей выходным сигналом. Однако резонаторные датчики имеют ряд ограничений. Прежде всего, это высокая чувствительность к воздействию внешних факторов, таких как температура, давление, вибрация и т. д., что приводит к появлению

дополнительных погрешностей в реальных условиях эксплуатации. Устранение указанных погрешностей путем термостатирования, уменьшения технологических допусков, усложнения конструкции и тщательного подбора материалов приводит к росту стоимости датчиков.

В связи с этим широкое распространение находят методы коррекции дополнительных погрешностей, отличительным признаком которых является обеспечение близости статической реальной функции преобразования и номинальной функции преобразования при воздействии корректирующего сигнала, формируемого вычислительным устройством. Следовательно, для реализации коррекции необходима разработка алгоритма оценки этой погрешности и выработки соответствующего корректирующего сигнала.

Суть предлагаемого метода коррекции дополнительной температурной погрешности (ТП) заключается в изменении конструкции дифференциального датчика таким образом, что один из чувствительных элементов датчика служит для определения измеряемой величины, а второй — для выработки корректирующего сигнала. Рассмотрим применение данного метода на примере коррекции дополнительной ТП струнного резонаторного датчика линейных перемещений.

Все механические резонаторные датчики, в том числе и струнные, имеют параболическую функцию преобразования вида [1]:

$$f = f_0 \sqrt{1 + kx}, \quad (1)$$

где x — измеряемая величина; f_0 — начальная частота колебаний резонатора; k — коэффициент, характеризующий чувствительность датчика.

Обычно дифференциальные датчики отличаются меньшей чувствительностью к изменению температуры, поскольку в режиме измерения разности информативных сигналов, полученных с двух чувствительных элементов, дополнительные погрешности взаимно вычитаются. Однако в случае применения частотных резонаторных датчиков такой эффект отсутствует из-за различной температурной чувствительности резонаторов. Дело в том, что резонаторы обычно настраивают на разные начальные частоты f_{01} , f_{02} для предотвращения взаимной синхронизации автогенераторов [1]. Влияние температуры приводит к изменению начальной частоты колебаний резонатора и чувствительности, так как коэффициент k зависит от f_0 . Таким образом,

функции преобразования резонаторов смещаются неравномерно и разность (отношение) частот оказывается зависимой от температуры t (рис. 1).

Так как для обработки измерительной информации при помощи вычислительных средств линейность функции преобразования не обязательна [2], возможна трансформация дифференциального преобразователя для работы в режиме с автоматической коррекцией дополнительной ТП. В этом случае один из резонаторов служит для определения входного сигнала, а второй используется в качестве измерителя температуры и вырабатывает корректирующий сигнал. Структурная схема предложенного метода коррекции дополнительной ТП резонаторных датчиков приведена на рис. 2.

На рис. 3 показаны экспериментальные результаты применения предложенного метода для коррекции дополнительной ТП нуля струнного датчика линейных перемещений. Для проведения исследований использовали дифференциальный датчик и датчик, практически аналогичный по конструкции, в котором измеряемая величина воздействует только на одну струну. Дифференциальный датчик испытывали в двух режимах — отношения и разности частот, а недифференциальный — в режимах с коррекцией дополнительной ТП и без коррекции (см. рис. 3).

Результаты эксперимента показали, что дополнительная ТП нуля в режиме коррекции уменьшается в 10—20 раз по сравнению с классическими дифференциальными режимами измерений разности либо отношения частот и в 10—15 раз меньше, чем при использовании одного резонатора в режиме без коррекции.

Для расчета корректирующего сигнала воспользуемся свойствами функции преобразования (1) резонаторных датчиков. Чем больше f_0 , тем меньше приращение частоты при одинаковой упругой деформации [1], и, следовательно, можно сделать вывод, что температурная чувствительность резонатора уменьшается с ростом частоты колебаний.

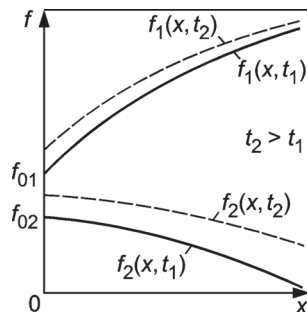


Рис. 1. Смещение функции преобразования дифференциального резонаторного датчика из-за изменения температуры

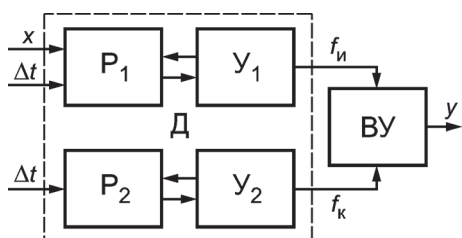


Рис. 2. Структурная схема метода коррекции дополнительной температурной погрешности резонаторных датчиков:

Д — датчик; P_1 , P_2 — резонаторы; Y_1 , Y_2 — электронные усилители, образующие вместе с резонаторами автогенераторы; ВУ — вычислительное устройство; x — измеряемая величина; f_i , f_k — информативный (частота) и корректирующий сигналы, соответственно; Δt — изменение температуры; y — выходной сигнал

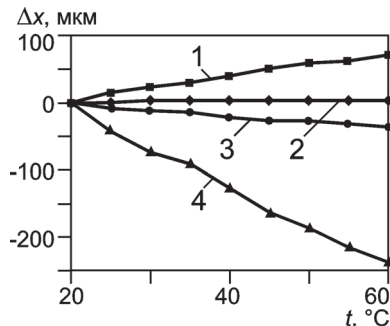


Рис. 3. Дополнительная температурная погрешность нуля струнных датчиков в следующих режимах работы:

1, 2 — в отсутствие коррекции и с дополнительной коррекцией, соответственно; 3, 4 — разности и отношения частот, соответственно

Для струнного резонатора запишем [1]:

$$f_0 = a \sqrt{F_0}; \quad f = f_0 \sqrt{1 + \Delta F / F_0},$$

где a — коэффициент, характеризующий чувствительность резонатора; F_0 , ΔF — сила начального натяжения струны и ее изменение, соответственно.

Тогда

$$\Delta f = f - f_0 = f_0 \left(\sqrt{1 + \frac{\Delta F}{F_0}} - 1 \right) = f_0 \left(\sqrt{1 + \frac{a^2 E l_0 \alpha' \Delta t}{f_0^2}} - 1 \right), \quad (2)$$

где l_0 — начальная длина струны; α' — разность между температурными коэффициентами линейного расширения корпуса датчика и струны; E — модуль упругости материала струны; Δt — изменение температуры.

Для упрощения (2) разложим его в степенной ряд, ограничимся первыми двумя членами и получим

$$\Delta f \approx a^2 E l_0 \alpha' \Delta t / f_0. \quad (3)$$

Таким образом, если изменения частоты измерительного резонатора обозначить как Δf_1 , а корректирующего резонатора через Δf_2 , то на основании (3) можно записать

$$\Delta f_1 / \Delta f_2 = \left[a_1^2 E_1 l_{01} \alpha'_1 \Delta t / f_{01} \right] / \left[a_2^2 E_2 l_{02} \alpha'_2 \Delta t / f_{02} \right] = b f_{02} / f_{01}, \quad (4)$$

где b — коэффициент, зависящий от свойств резонаторов.

Из (4) следует, что значение корректирующего сигнала, равное изменению частоты Δf_1 , можно найти как

$$f_k = \Delta f_{01} = b \Delta f_{02} (f_{02} / f_{01}). \quad (5)$$

Выражение (5) является основным для коррекции дополнительной ТП датчика. Если частота первого резонатора (информативного) определяется по формуле

$$f_1 = (f_{01} + \Delta f_{01}) \sqrt{1 + kx},$$

а второго (корректирующего) как

$$f_2 = f_{02} + \Delta f_{02},$$

то при выполнении условия (4) получим соотношение для определения линейного перемещения

$$x = \frac{1}{k} \left[f_1^2 \left(f_{01} + (f_2 - f_{02}) b \frac{f_{02}}{f_{01}} \right)^{-2} - 1 \right]. \quad (6)$$

Итак, алгоритм обработки сигналов для коррекции дополнительной ТП нуля следующий: измерение частот колебаний резонаторов

f_1, f_2 ; определение измеряемой величины по (6). Алгоритм пригоден для коррекции температурной погрешности в процессе выполнения измерений. В этом случае f_1 изменяется при воздействии измеряемой величины x , и корректирующий сигнал также будет изменяться в соответствии с (5), тогда (6) можно представить в виде

$$x = \frac{1}{k} \left[f_1^2 \left(f_{01} + (f_2 - f_{02}) b \frac{f_{02}}{f_1} \right)^{-2} - 1 \right].$$

Достоинства данного метода коррекции: существенно уменьшается дополнительная ТП датчика, нет необходимости подключать вспомогательное средство измерений для определения температуры и рассчитывать тепловую инерционность преобразователя, так как резонаторы, как правило, находятся в идентичных условиях. Кроме того, при применении данного метода возможна коррекция других дополнительных погрешностей, вызванных влиянием, например, атмосферного давления и напряжения питания. Однако для уменьшения дополнительных погрешностей, вызванных механическими воздействиями, следует применять иные методы [3].

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Карцев Е. А., Коротков В. П.** Унифицированные струнные измерительные преобразователи. М.: Машиностроение, 1982.
2. **Скачко Ю. В. и др.** Особенности применения мультимедийных ЭВМ в частотно-цифровых средствах измерений линейных перемещений // Измерительная техника. 2006. № 10. С. 26—29; **Skachko Yu. V. et al.** Features of using multimedia computers in frequency-numerical measurement provisions for linear displacements // Measurement Techniques. 2006. V. 49. N 10. P. 991—995.
3. **Скачко Ю. В., Юрин А. И.** Анализ влияния вибрации на погрешность струнного резонатора // Измерительная техника. 2006. № 12. С. 14—16; **Skachko Yu. V., Yurin A. I.** Effects of vibration on the errors of a string resonator // Measurement Techniques. 2006. V. 49. N 12. P. 1189—1193.

Дата принятия 21.10.2013 г.

