

УДК 53.082.13

Г.А. ЧЕРЕПАЩУК

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ПОВЫШЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ**

Рассмотрены причины возникновения погрешностей при измерении массы, силы и деформаций тензометрическим методом. Предложен способ расширения полосы пропускания измерительных каналов для повышения точности при динамических измерениях.

погрешность, метрологические характеристики, измерительный канал, передаточная функция, динамическая характеристика, полоса пропускания, коррекция результатов измерений

Введение

Основными требованиями, предъявляемыми к современным средствам измерения массы, силы и деформации, являются повышение точности и снижение стоимости. Например, при товарно-коммерческих расчетах предпочтительно пользоваться высокоточными средствами измерения массы, чтобы исключить возможные недоразумения между сторонами. Измерения сил и деформаций проводят во время испытаний конструкций в целях выявления их фактической надежности. Высокая точность полученной информации снижает вероятность ошибки при прочностных расчетах и риск негативных последствий в случае неверного определения срока службы конструкции.

Высокие технические и метрологические характеристики приборов и систем при условии оптимальной стоимости позволяют их производителям успешно конкурировать на рынке измерительной техники. Следовательно, разработчики уделяют особое внимание конструкции и составу проектируемого изделия, а также характеристикам используемых элементов.

В подавляющем большинстве средств измерения массы, силы и деформаций в настоящее время используют тензометрический принцип преобразования. При этом применяют датчики мостового типа с выходом по напряжению.

Чувствительность датчика определяется как отношение выходного напряжения к напряжению возбуждения мостовой схемы. Для датчиков силы она составляет 1–5 мВ/В. Если напряжение возбуждения равно 5 В, то максимальный выходной сигнал составляет от 5 до 25 мВ при напряжении питания моста 5В. Обеспечить высокую точность измерения сигнала такого низкого уровня достаточно сложно. Это связано с наличием контактных термоЭДС в узлах соединения моста, временным дрейфом мостового датчика [1], непостоянством сопротивления соединительных проводов, зависящего от внешних влияющих факторов, нестабильностью источника питания, наличием наводок, временным и температурным смещением нуля усилителя, низкой эффективной разрешающей способностью АЦП. В динамическом режиме работы измерительного канала его точность ограничивается низким быстродействием АЦП.

1. Способы компенсации погрешностей тензометрических каналов в статическом режиме

Для компенсации погрешностей датчика и вторичной измерительной части применяют ряд аппаратных и программных методов компенсации. Типовая структурная схема тензометрического измерительного канала показана на рис. 1.

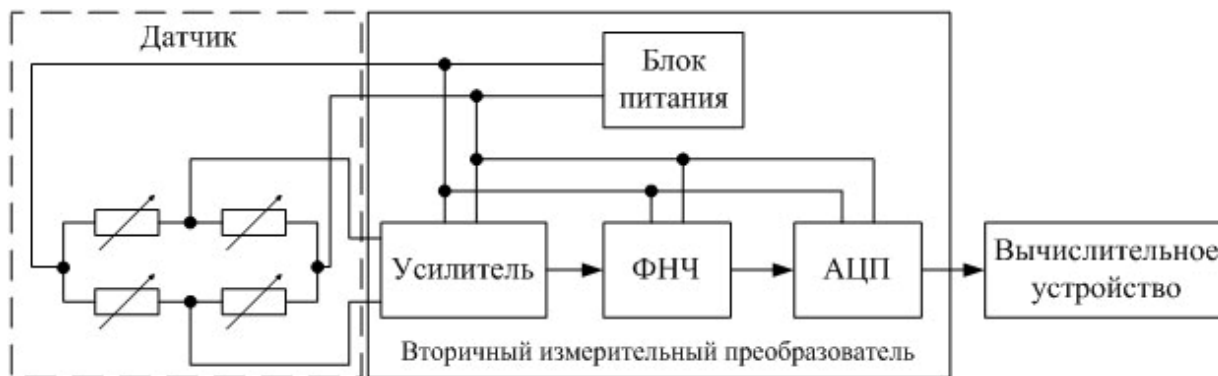


Рис. 1. Структурная схема тензометрического измерительного канала

Для нейтрализации эффекта паразитных термопар в узлах мостовой схемы и подавления шум типа $1/f$ питание моста осуществляется переменным током. Этот способ позволяет также получить достаточный уровень выходного сигнала при меньшем токе возбуждения. Уменьшение уровня тока возбуждения способствует меньшему нагреву тензорезисторов и уходу их метрологических характеристик. При использовании длинного соединительного кабеля питание переменным током обеспечивает большую помехозащищенность.

Погрешность, связанную с нестабильностью источника питания, компенсируют методом измерения соотношений. При этом используют один и тот же источник для питания моста и в качестве опорного источника для аналого-цифрового преобразователя [3].

Для увеличения разрешающей способности АЦП применяют метод передискретизации, который заключается в увеличении количества отсчетов и дальнейшей их статистической обработки. Этот способ требует увеличения времени измерения и объема памяти средства измерения.

При проектировании тензометрических каналов разработчикам рекомендуется использовать сигма-дельта АЦП [2]. Он отличается высоким разрешением (до 24 разрядов), очень хорошей дифференциальной линейностью, низкой потребляемой мощностью, приемлемой стоимостью. Единственная проблема, ограничивающая

применение этого типа АЦП при динамических измерениях, узкая полоса пропускания.

Современные технологии изготовления интегральных микросхем позволяют создавать на одном кристалле устройства сбора информации с тензодатчиков, содержащие все необходимые компоненты для получения высококачественной измерительной системы. Использование таких микросхем упрощает конструкцию устройства и снизит его стоимость без потери качества. Примерами таких микросхем являются AD7711, AD7714, AD7730, AD7799 и другие, выпускаемые фирмой Analog Devices. В частности AD7730 входит в состав измерительного канала системы ВМП-9 для динамических испытаний конструкций, созданной в ООО «Инженерное бюро Авиационного института». AD7730 специально предназначена для непосредственного подключения к датчикам мостового типа в приложениях, связанных с тензоизмерениями. Она принимает сигналы низкого уровня непосредственно с измерительного моста и дает на выходе последовательные цифровые данные. Два буферизованных дифференциальных входа мультиплексируются и подаются на усилитель с программируемым усилением. Микросхема содержит 6-разрядный ЦАП, который управляется внутренними регистрами и может (при взвешивании) компенсировать вес тары (вес упаковки) со стороны аналогового входа. Микросхема AD7730 имеет режимы самокалибровки

и системой калибровки. AD7730 может получать входные сигналы с мостового датчика, возбуждаемого как постоянным напряжением, так и переменным. Все эти устройства, входящие в состав одной микросхемы, упрощают конструкцию прибора и одновременно позволяют компенсировать возможные статические погрешности измерения.

AD7730 содержит внутренний программируемый цифровой фильтр, который обрабатывает отсчеты сигма-дельта модулятора и, тем самым, снижает уровень зашумленности информативного сигнала. Фильтр состоит из двух секций: фильтра первого каскада и фильтра второго каскада. Первый каскад является НЧ-фильтром вида (sinc^3). Частота среза и скорость выдачи данных с фильтра программируется. Фильтр второго каскада имеет три режима работы. В нормальном режиме он представляет собой 22-элементный фильтр с конечным импульсным откликом (КИХ), обрабатывающий выходные сигналы фильтра первого каскада. Если на аналоговом входе идентифицируется ступенчатое изменение сигнала, фильтр второго каскада переходит во второй режим работы (быстрое восстановление - FASTStep), в котором он выполняет усреднение по переменному массиву измерений, а после окончания переходных процессов возвращается в режим фильтра с конечным импульсным откликом. Третий режим работы фильтра (режим пропуска - SKIP mode) состоит в том, что фильтр полностью отключается и вся фильтрация осуществляется первым каскадом.

Микросхема AD7730 требует внешнего источника опорного напряжения. Однако в качестве такого источника можно использовать источник питания, если измерения проводятся способом измерения соотношений. В такой конфигурации выходное напряжение измерительного моста прямо пропорционально напряжению возбуждения, которое также

используется в качестве напряжения опорного источника для AD7730 [4].

Указанные методы компенсации статических погрешностей и примеры их аппаратной реализации позволяют создавать высококачественные измерительные системы без усложнения конструкции измерительных каналов.

2. Компенсация динамических погрешностей каналов с сигма-дельта АЦП

Недостаточное быстродействие сигма-дельта АЦП требует программной коррекции результатов измерений системы ВПП-9. Коррекция заключается в решении операторного уравнения динамики измерительного канала вида

$$x(t) = B^{-1}[y(t)], \quad (1)$$

где $y(t)$ – выходной сигнал измерительного канала;

B^{-1} – обратный оператор.

Для решения уравнения (1) нужно получить динамическую модель измерительного канала. При использовании сигма-дельта АЦП для подавления помех фильтр низких частот не применяют, так как сигма-дельта модулятор сам по себе обладает фильтрующими свойствами. Усилитель в измерительном канале более быстродействующий, чем АЦП, поэтому его инерционностью можно пренебречь и остановиться на анализе динамических характеристик непосредственно сигма-дельта АЦП.

Сигма-дельта АЦП состоит из сигма-дельта модулятора и цифрового фильтра. Структурная схема модулятора первого порядка показана на рис. 2. Порядок модулятора определяется количеством каскадов интегрирования и суммирования. Если же вместо компаратора применить n -разрядный АЦП, а одноразрядный ЦАП заменить n -разрядным, то получится n -разрядный сигма-дельта модулятор. В AD7730 применяют одноразрядный модулятор, поэтому на нем и остановимся.

Передаточная характеристика сигма-дельта

модулятора получается исходя из его структуры и принципа работы. Передаточная функция



Рис. 2. Структурная схема сигма-дельта модулятора первого порядка

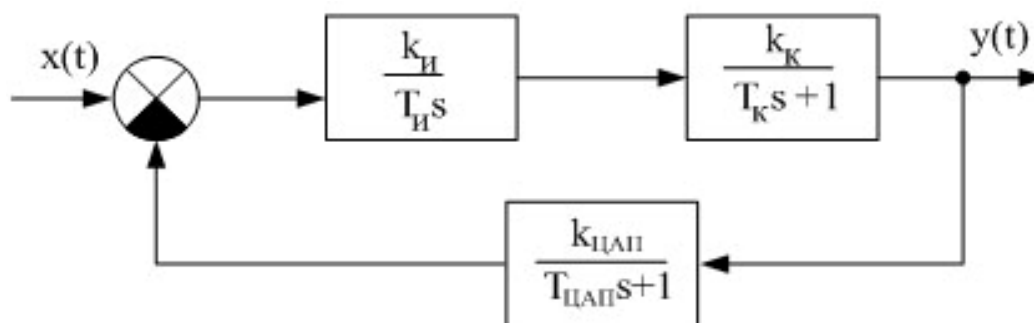


Рис. 3. Динамическая модель сигма-дельта модулятора первого порядка

$$W_I(s) = \frac{k_I}{T_I s}, \quad (2)$$

где s – оператор Лапласа;

k_I – коэффициент преобразования интегратора;

T_I – постоянная времени интегрирования.

Компаратор и одноразрядный ЦАП являются аperiodическими звеньями первого порядка с передаточными функциями:

$$W_K(s) = \frac{k_K}{T_K s + 1}, \quad (3)$$

$$W_{\text{ЦАП}}(s) = \frac{k_{\text{ЦАП}}}{T_{\text{ЦАП}} s + 1}, \quad (4)$$

где k_K , $k_{\text{ЦАП}}$ – соответственно коэффициенты преобразования компаратора и ЦАП;

T_K , $T_{\text{ЦАП}}$ – соответственно постоянные времени компаратора и ЦАП.

Таким образом, схема рис.2 сводится к схеме, показанной на рис. 3.

Передаточная функция сигма-дельта модулятора первого порядка определяется следующим

выражением:

$$W(s) = \frac{k_I k_K (T_{\text{ЦАП}} s + 1)}{T_I s (T_K s + 1) (T_{\text{ЦАП}} s + 1) + k_I k_K k_{\text{ЦАП}}}. \quad (5)$$

Выходной сигнал сигма-дельта модулятора является дискретной последовательностью импульсов с частотой тактирования компаратора f_T . Период тактирования не меньше времени установления переходного процесса компаратора и ЦАП, следовательно инерционными свойствами этих элементов можно пренебречь. Выражение (5) преобразуется к виду

$$W(s) = \frac{k_I k_K}{T_I s + k_I k_K k_{\text{ЦАП}}}. \quad (6)$$

Z-преобразование выражения (6) согласно [6] имеет вид

$$W(z) = \frac{1 - e^A}{k_{\text{ЦАП}} (z - e^A)}, \quad (6)$$

где $A = -\frac{k_I k_K k_{\text{ЦАП}}}{T_I} T$, (7)

T – интервал дискретизации.

Сигма-дельта АЦП состоит из двух частей: сигма-дельта-модулятора и цифрового фильтра. Первая ступень – это низкочастотный фильтр с характеристикой sinc^3 . Передаточная функция этого фильтра в z -области имеет вид:

$$W(z) = \left[\frac{1 - z^{-M}}{M(1 - z^{-1})} \right]^3, \quad (8)$$

где M – целое число, которое равно отношению тактовой частоты модулятора к частоте отсчетов фильтра.

При динамических измерениях вторая часть фильтра отключается с целью ускорить преобразование АЦП, поэтому передаточная характеристика всего фильтра описывается выражением (8).

Полная передаточная функция АЦП получается путем умножения передаточной функции модулятора (6) и фильтра (8):

$$W(z) = \frac{1 - e^{-A}}{k_{\text{цап}}(z - e^{-A})} \left[\frac{1 - z^{-M}}{M(1 - z^{-1})} \right]^3. \quad (9)$$

Полученное выражение (9) является динамической моделью сигма-дельта АЦП с одноканальным модулятором. Все параметры, входящие в (9), определяются экспериментальным путем во время метрологических исследований измерительных каналов.

В случае применения АЦП с модулятором более высокого порядка его математическая модель получается исходя из аналогичных рассуждений.

Заключение

Статические погрешности измерительных тензометрических каналов эффективно компенсируются аппаратными методами. Современные специализированные микросхемы высокой степени интеграции позволяют создавать измерительные системы с высокими метрологическими характеристиками и минимумом

используемых элементов.

Динамические погрешности тензометрических измерительных каналов компенсируются путем математической обработки результатов измерений. Это позволяет обеспечить требуемую точность весо- и силоизмерительных систем без удорожания аппаратной части. Компенсация динамических погрешностей основана на применении метода регуляризации для измерительных каналов, построенных на базе сигма-дельта АЦП. Полученная динамическая модель сигма-дельта АЦП может быть использована при решении операторного уравнения динамики измерительного канала. Параметры модели уточняются в ходе экспериментальных исследований и являются параметрами алгоритмов коррекции, заложенных в программном обеспечении системы

Литература

1. Слаттери К., Най М. Особенности проектирования высококачественных весоизмерительных систем // ЭКИС. – 2006. – №9. – С.3-7.
2. О'Греди А. Методы возбуждения измерительных датчиков и применение ИС AD7711 и AD7730 // Компоненты и технологии. – №3. – 2003. – С.50-55.
3. Гельман М.М. Аналого-цифровые преобразователи для информационно-измерительных систем. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 320 с.
4. Материалы сайта АВТЭКС СПб [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.autexspb.da.ru>
5. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления. – М.: Машиностроение, 1986. – 448 с.

Поступила в редакцию 15.02.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.К. Волосюк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.