

Инструментальный усилитель AD8555:

измерительные системы на мостовых тензодатчиках становятся проще и совершеннее

Резистивные мостовые тензодатчики широко применяются там, где нужно преобразовать физическую величину — такую, как давление, сила или вес, — в электрический сигнал. Этот электрический сигнал обычно довольно мал, поэтому его необходимо усилить, прежде чем подавать на вход АЦП измерительной системы. В данной статье говорится о новом интегральном инструментальном усилителе, обладающем малым уровнем дрейфа и многочисленными возможностями, и о его применении в системах с тензодатчиками на примере датчика давления.

Реза Могими
Перевод:
Алексей Власенко

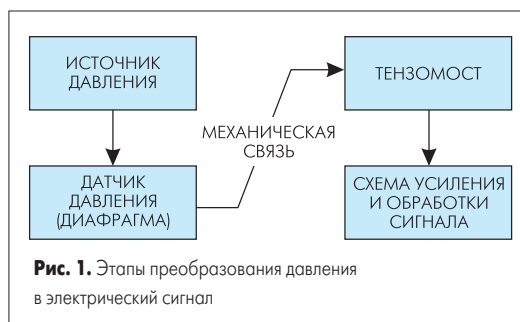
alexey.vlasenko@analog.spb.ru

Измерение давления

На рис. 1 показана функциональная схема типичной системы измерения давления. Давление вызывает смещение механического элемента — такого, как диафрагма, трубка Бурдона (упругая трубка, согнутая полукольцом), металлическая «гармошка» и т. п. Это смещение приводит к изменению сопротивления резисторов тензомоста.

Наиболее распространены датчики давления, основанные на резистивной мостовой схеме Уитстона, в которой все четыре элемента могут изменять свое сопротивление под действием деформации, что обеспечивает оптимальную линейность и чувствительность. Когда давление передается через диафрагму, два резистивных элемента моста подвергаются растяжению, два других — сжатию. При этом их сопротивление меняется пропорционально действующему давлению. Мостовая схема возбуждается при помощи постоянного напряжения или тока, в результате чего на выходе схемы возникает электрический сигнал.

Резистивные элементы могут быть связаны механически с металлической диафрагмой, и их сопротивление изменяется в пределах около 0,1% от номинального значения. Когда к мосту приложено напряжение или подан ток, столь небольшое изменение величин сопротивлений резистивных элементов приводит к разбалансировке моста и к появлению дифференциального напряжения (или тока) на выходе.



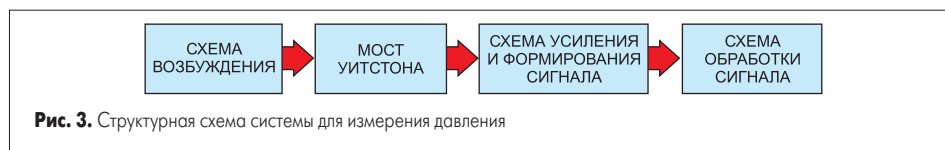
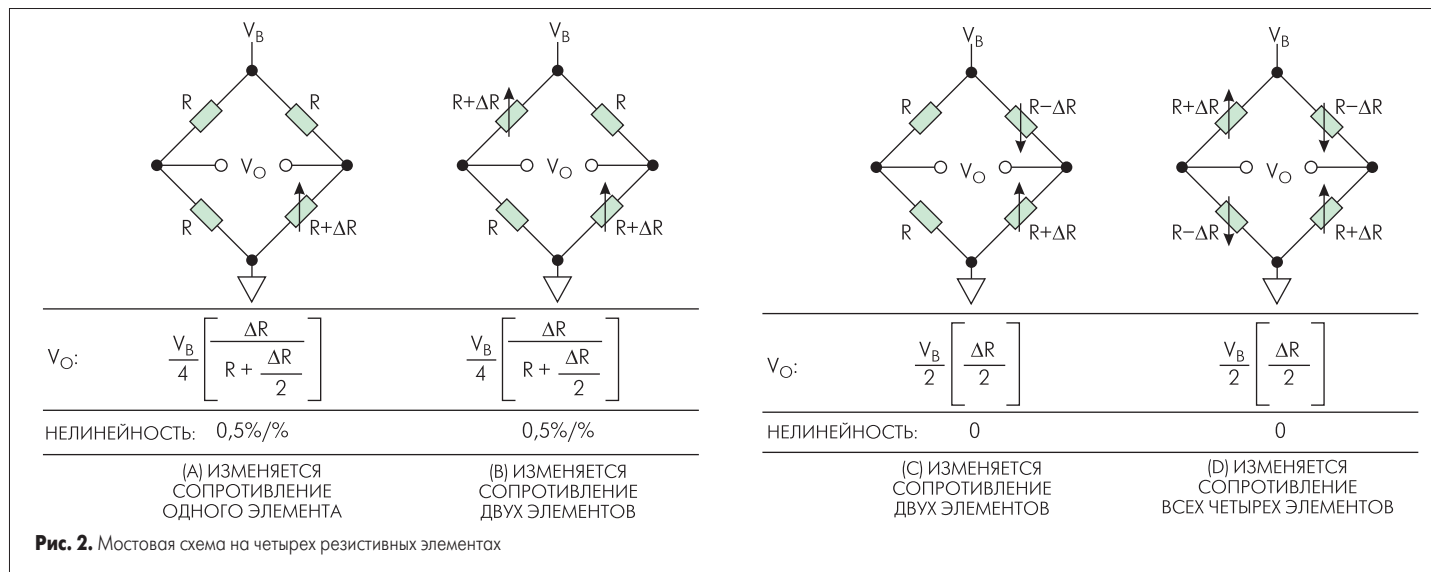
Другой вариант конструкции моста — полупроводниковые резистивные элементы, которые могут быть запрессованы в упругую диафрагму. В таком тензодатчике сопротивление резистивного элемента может меняться в большей степени — около 1% от номинального значения.

Очень хорошее и подробное описание принципов работы тензодатчиков и мостовых схем различных конфигураций имеется в книге Analog Devices Sensor Signal Conditioning manual [1]. (Также имеется перевод на русский язык материалов семинара по датчикам, см. [2] — А.В.)

Усиление и формирование сигнала

Сигнал, возникающий на выходе тензомоста, обычно довольно мал и содержит шум, а также погрешности смещения и усиления. Прежде чем подвергать этот сигнал оцифровке, его необходимо усилить, откорректировать смещение в соответствии с диапазоном входного сигнала АЦП и отфильтровать с целью уменьшения уровня шума. Блок усиления и формирования сигнала, обозначенный на рис. 3, может быть сконструирован на операционных усилителях и дискретных элементах, однако применение специализированных инструментальных усилителей способствует снижению затрат, уменьшению размеров устройства и экономии времени разработчика.

В типичных случаях дифференциальный сигнал на выходе тензомоста — его размах составляет десятки или сотни милливольт — пропорционален давлению и напряжению возбуждения, приложенному к мосту. Например, рабочий диапазон датчика давления Honeywell 26PC01SMT составляет $\pm 1,0$ psi. При напряжении возбуждения 5 В смещение нуля (при нулевом давлении) на выходе будет составлять около ± 2 мВ, а полный размах выходного дифференциального напряжения составит от $\pm 14,7$ мВ до $\pm 18,7$ мВ, при этом синфазное напряжение будет равно 2,5 В. Для того чтобы с высокой точностью



измерить это небольшое дифференциальное напряжение в присутствии большого синфазного напряжения, необходим инструментальный усилитель с присущей ему способностью подавлять синфазный сигнал. Например, при разрешающей способности 12 разрядов напряжение единицы младшего разряда (1 LSB) будет составлять менее 10 мкВ (35 мВ/4096), что на 101 дБ ниже уровня синфазного сигнала.

Ручная подстройка тензомоста

Мост Уитстона в системе измерения давления обычно подстраивается вручную, для того чтобы устранить погрешность и откорректировать рабочий диапазон. Подразумевается в процессе производства измерительной системы подстройка таких параметров, как смещение, дрейф температуры, коэффициент передачи и дрейф коэффициента передачи. На рис. 4 показан мост, снабженный подстроечными резисторами для компенсации перечисленных погрешностей. Процесс подстройки занимает время и повышает стоимость готового изделия. Альтернативная возможность — калибровка смещения с помощью подачи сигнала с выхода цифро-аналогового преобразователя на опорный вход инструментального усилителя. Кор-

рекция смещения необходима, так как в противном случае погрешность смещения будет уменьшать динамический диапазон системы.

Ввиду некоторого разброса коэффициента преобразования датчика для большинства измерительных систем требуется регулировка усиления. Обычно это осуществляется посредством подключения подстроечного потенциометра последовательно с внешним резистором, устанавливающим коэффициент усиления инструментального усилителя. Для того чтобы обеспечить хорошие характеристики в широком температурном диапазоне, более предпочтительна программная установка и подстройка усиления.

Погрешности инструментального усилителя

На рис. 5 показаны типичные источники погрешностей при подключении датчика к схеме усиления и формирования сигнала. Ток смещения входа инструментального усилителя протекает через резисторы тензомоста. Любой разбаланс сопротивлений тензомоста или ток смещения входа усилителя приводит к появлению погрешности смещения. Эта погрешность, умноженная на коэффициент усиления, появляется на выходе. Кроме того, напряжение смещения и ток смещения зависят от температуры. Другие важ-

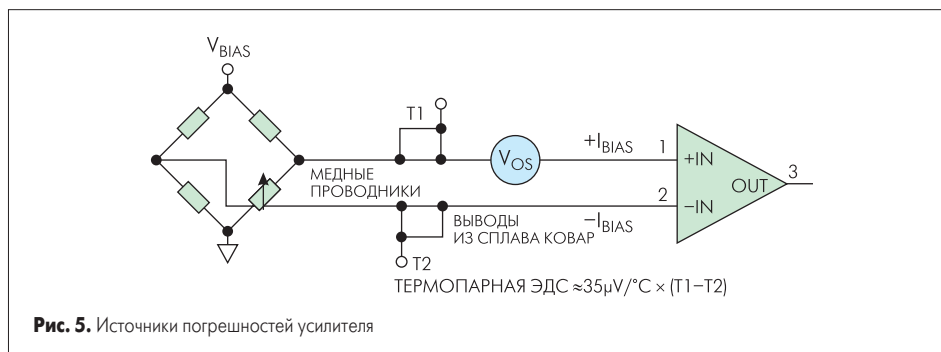
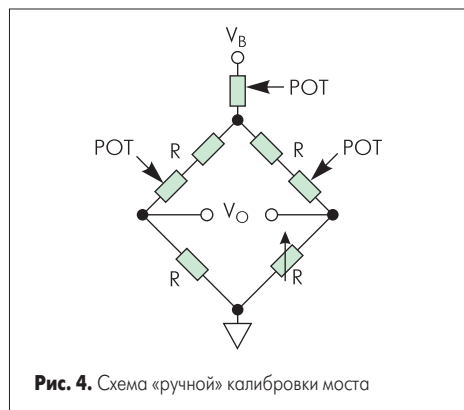
ные источники погрешностей — это точность установки коэффициента усиления усилителя, нелинейность усилителя и шум. Для системы с мостовым тензодатчиком требуется усилитель, обладающий высокими значениями точности установки коэффициента усиления, низким током смещения, малым дрейфом напряжения смещения и малым дрейфом тока смещения.

Усилитель AD8555 решает рассмотренные проблемы

Для измерительных систем на основе мостовой схемы, таких, как системы измерения давления, фирма Analog Devices разработала усилитель AD8555 — новый инструментальный усилитель с нулевым дрейфом и цифровым программированием параметров. Данный инструментальный усилитель построен на трех ОУ с автоподстройкой нуля (A1, A2, A3) — см. рис. 6.

Для того чтобы не нагружать мостовой датчик, дифференциальный вход усилителя обладает высоким импедансом и малой величиной тока смещения на обоих входах (V_{POS} и V_{NEG}). Технология автоподстройки нуля минимизирует смещение и дрейф смещения за счет непрерывной коррекции ошибки усилителя по постоянному току (каким образом это делается — см. [3]). В результате максимальная величина смещения составляет 10 мкВ в температурном диапазоне $-40...+125^\circ\text{C}$, при этом величина дрейфа не превышает $65 \text{ нВ}/^\circ\text{C}$.

Величину коэффициента усиления в диапазоне от 70 до 1280 можно запрограммировать с шагом менее 1 (что соответствует разре-



ИС AD8555 в схеме усиления и формирования сигнала мостового тензодатчика

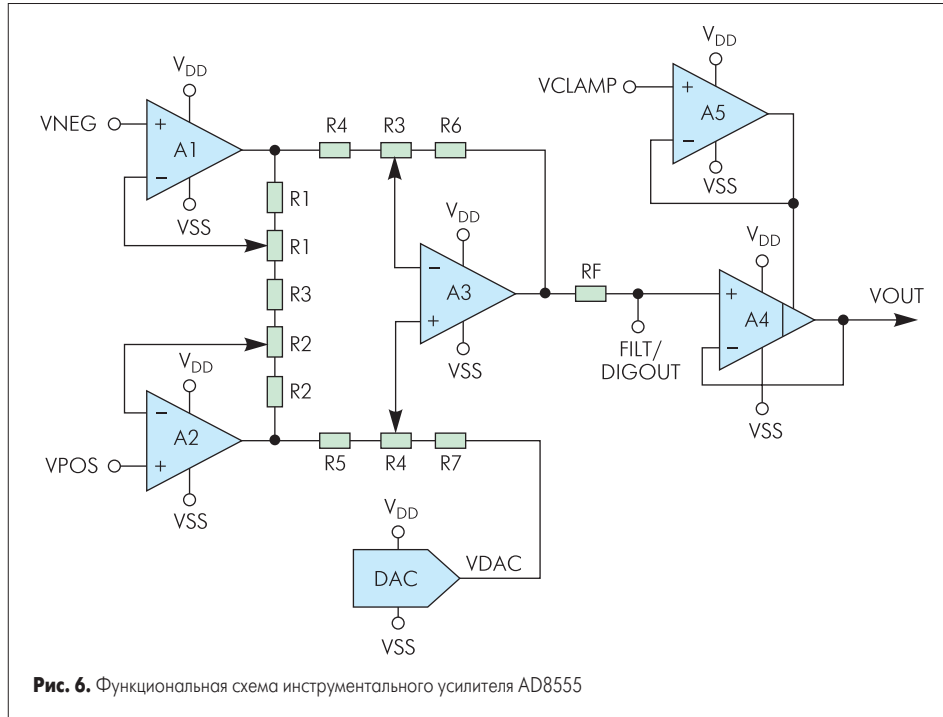


Рис. 6. Функциональная схема инструментального усилителя AD8555

нию лучше чем 0,4%) через однопроводной последовательный интерфейс в каждом из двух каскадов усиления отдельно. В технологии DigiTrim® установленный коэффициент усиления фиксируется за счет «пережигания» перемычек из поликристаллического кремния. Коэффициент усиления первого каскада устанавливается в диапазоне от 4,00 до 6,40, в этом диапазоне имеется 128 значений коэффициента усиления, соответствующих значению 7-разрядного кода, при этом регулируются потенциометры P1 и P2; усиление второго каскада составляет от 17,5 до 200 и может иметь 8 различных значений, которые определяются 3-разрядным кодом, при этом регулируются потенциометры P3 и P4. Значения коэффициентов усиления можно установить, затем проконтролировать работу системы, затем установить новое значение — прежде чем запрограммировать эти коэффициенты усиления окончательно.

В ИС AD8555 также имеется возможность программирования смещения с помощью 8-разрядного ЦАП, что позволяет компенсировать погрешность смещения датчика, а также устранить погрешность, возникающую из-за тока смещения. Смещение можно использовать, например, для преобразования биполярного сигнала в однополярный для работы с одним источником питания. Разрешающая способность системы установки смещения составляет 0,39% от напряжения питания ($V_{DD} - V_{SS}$).

$$V_{out} = (Gain) \times (V_{diff}) + V_{offset}$$

$$V_{offset} \approx \left(\frac{N_{DAC-code} + 0,5}{256} \right) \times (V_{DD} - V_{SS}) + V_{SS}$$

где Gain = (Усиление 1 каскада) × (Усиление 2 каскада); v_{diff} — дифференциальное напряжение, которое нужно измерить; $N_{DAC-code}$ — величина кода на входе ЦАП.

Точно так же, как и усиление, смещение может быть установлено временно, переустанов-

лено, а уже потом зафиксировано окончательно путем «пережигания» перемычек.

Возможность работы от одного источника питания — условие, которое является очень желательным при выборе современного инструментального усилителя. Многие современные системы сбора данных питаются от однополярного низковольтного источника. Усилитель AD8555 работает при однополярном питании напряжением от 2,7 до 5,5 В. Выходной сигнал усилителя может находиться в пределах диапазона напряжения питания, приближаясь к напряжениям питания с «зазором» около 7 мВ.

Схема обнаружения неисправности ИС AD8555 способна обнаруживать обрыв датчика, короткое замыкание на входе или «плавающий» вход. При любом из этих состояний выходной сигнал усилителя переходит в низкий уровень, приближаясь к «земле» или VSS. Замыкание или обрыв также обнаруживаются на входе V_{CLAMP} . При помощи внешнего конденсатора, подключенного к AD8555, можно организовать низкочастотную фильтрацию с частотой среза до 400 кГц.

Инженеры-разработчики предпочли бы, чтобы все датчики давления одинаковой марки имели идентичные характеристики. Но обычно выпускаемые промышленностью датчики не обеспечивают высокую идентичность параметров. Единственный способ, которым можно было бы добиться идентичности датчиков, — это их дополнительная калибровка при производстве. Если поведение датчиков в зависимости от температуры было бы одинаково, можно было бы использовать программируемые усилители нового поколения для обеспечения компенсации ухода параметров.

ИС AD8555 с инструментальным усилителем с нулевым дрейфом обеспечивает возможность калибровки усиления и смещения с помощью цифрового интерфейса. Этот прибор может компенсировать погрешность смещения и погрешность коэффициента преобразования мостовых тензодатчиков, а также обнаруживать сбой в работе датчика. Регулировка параметров осуществляется программным путем, что позволяет избавиться от подстроечных резисторов и трудоемкого процесса калибровки. Во многих случаях, когда от измерительной системы требуется компактность, надежность, возможность работы в широком температурном диапазоне, ИС AD8555, выпускаемая в корпусе LFCSP размером 4×4 мм, становится наиболее удачным вариантом выбора. ИС AD8555 может работать с нагрузкой, обладающей довольно большой емкостью, поэтому она может быть расположена вблизи датчика и соединена со схемой обработки сигнала длинным кабелем. Высокая степень функциональной интеграции и высокая точность выделяют данную ИС из ей подобных.

Пример применения

В ряду датчиков одинаковой марки величина смещения может достигать 20%. Коэффициент передачи датчика также может различаться почти в два раза. Ниже показано, каким образом с помощью ИС AD8555 можно

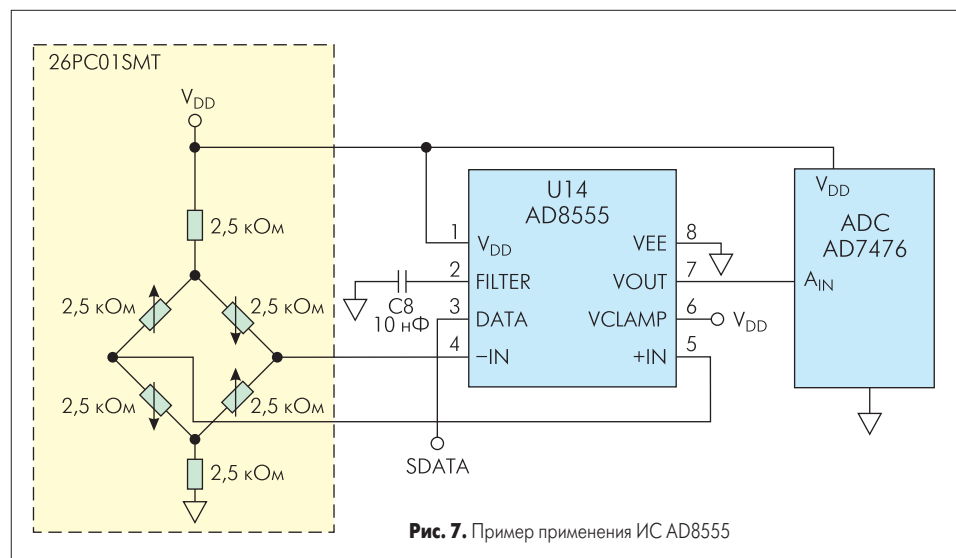


Рис. 7. Пример применения ИС AD8555

компенсировать разницу в напряжении смещения и коэффициентах передачи, что способствует расширению динамического диапазона при дальнейшей оцифровке сигнала. На рис. 7 показана схема измерительной системы, в которую входят мостовой тензодатчик, ИС AD8555 и АЦП AD7476.

Характеристики датчика

Датчик давления для поверхностного монтажа 26PC01SMT представляет собой мостовой датчик, который совместно с ИС AD8555 представляет собой довольно компактный программируемый блок измерения давления. В техническом описании приведены его спецификации для напряжения питания 10 В, мы пересчитали их для 5-вольтового питания (табл. 1).

Таблица 1

Тип измерения	Абсолютный или разностный
Диапазон измерения	± 7 кПа
Входное сопротивление, кОм	5,5–11,5
Выходное сопротивление, кОм	1,5–3,0
Диапазон выходного напряжения, мВ (при давлении ± 7 кПа)	$\pm 14,7$ min, $\pm 16,7$ typ, $\pm 18,7$ max
Изменение коэффициента преобразования в пределах температурного диапазона	$\pm 1,5\%$ typ, $\pm 4,5\%$ max
Начальное смещение нуля, мВ	-2...+2
Смещение нуля в диапазоне температур 0...25 °C, 25...50 °C, мВ	± 1 max
Нелинейность, %	$\pm 0,50\%$ typ, $\pm 1,75\%$ max
Погрешность повторяемости параметров и гистерезис, %	0,20% max
Допустимая перегрузка	138 кПа

Характеристики усилителя

Схема усиления также вносит некоторую погрешность, которая проявляется в виде смещения. Погрешности усилителя AD8555 перечислены в таблице 2.

Из таблицы видно, что доминируют статические погрешности на входе усилителя AD8555. Они могут быть устранены калибровкой усилителя, так же как и разброс параметров датчика. Погрешности, вызываемые шумом тока, дрейфом усиления и смещения, минимальны, и их можно проигнорировать. Остаются ошибки, которые невозможно устранить калибровкой — это шум и нелинейность усиления.

Так как шум ограничивает точность и разрешающую способность, при точных измерениях слабого сигнала требуется малошумящий усилитель с малым дрейфом. Усилитель AD8555 обладает плотностью шума, приведенного ко входу, около 32 нВ/√Гц. Величина шума в диапазоне от постоянного тока до 10 Гц составляет 0,7 мкВ (размах от пика до пика).

Мост, усилитель AD8555 и АЦП питаются от источника питания напряжением 5 В. Размах напряжения на выходе моста находится в пределах от $\pm 14,7$ до $\pm 18,7$. Напряжение смещения при нулевом давлении находится в диапазоне ± 2 мВ. Тогда требуемый коэффициент усиления усилителя при диапазоне сигнала на входе АЦП от 0 до 5 В будет составлять

Таблица 2

Параметр	Погрешность	PPM ($\times 10^{-4}$)
Напряжение смещения на входе	$(2 \text{ мкВ} + 2 \text{ мВ}/150) \times 150$	458
Входной ток смещения	$2500 \text{ Ом} \times 200 \text{ нА} \times 150$	15
Погрешность коэффициента усиления	0,5%	5000
Коэффициент ослабления синфазного сигнала	100 дБ	750
Нелинейность усиления (1)	50 ppm	50
Шум вида 1/f в диапазоне 0,1...10 Гц (2)	$0,7 \text{ мкВ} \times 150$	21
Суммарная погрешность без калибровки	~7 разрядов	6294
Суммарная погрешность после калибровки	~14 разрядов	71

Условия: $R_{\text{моста}} = 2500 \text{ Ом}$, диап. полной шкалы = $\pm 16,7 \text{ мВ}$, $A_V = 150$, $V_{\text{Синф}} = 2,5 \text{ В}$, $V_{\text{Вых}} = 0...5 \text{ В}$.

от 134 до 170. При смещении выходного сигнала 2,5 В сигнал будет находиться в пределах от 0 до 5 В при изменении давления в пределах ± 7 кПа.

Сначала следует установить минимальное усиление — 134. При нулевом давлении на входе следует установить смещение таким образом, чтобы на выходе усилителя было напряжение 2,5 В. При этом компенсируется как напряжение смещения датчика, так и напряжение смещения самого усилителя. Затем нужно подать давление ± 7 кПа и путем подбора коэффициента усиления добиться напряжения на выходе усилителя 5 В — 1 LSB. Смещение на выходе также зависит от установленного коэффициента усиления, поэтому калибровка смещения и усиления должна быть произведена повторно. Или же можно вычислить необходимый коэффициент усиления после измерения размаха выходного сигнала, а уже потом можно откалибровать смещение, тогда калибровка будет осуществлена за один прием.

Заключение

Усилитель AD8555 упрощает конструкцию измерительной системы на базе тензомоста за счет предоставления следующих возможностей: наличия усилителя с автоподстройкой нуля и программируемым коэффициентом усиления, возможности программирования смещения, обнаружения неисправности датчика, низкочастотной фильтрации, — все это в целом обеспечивает всю сигнальную цепочку от датчика до АЦП.

Фирма Analog Devices предоставляет удобную возможность ознакомиться с работой усилителя — для этого фирма выпускает оценочную плату AD8555AR-EVAL.

Литература

1. http://www.analog.com/Analog_Root/static/pdf/amplifiersLinear/training/Sensor_sect2.pdf.
2. http://www.autex.ru/lib/seminar/sensor_1999.zip.
3. Усилители с автокоррекцией нуля (choppers). http://www.analog.spb.ru/Public/pub_opamp.htm