

# Аналоговые устройства фирмы Maxim Integrated Products для нормирования сигналов датчиков

**В статье рассматриваются аналоговые интегральные схемы серии MAX14xx производства фирмы Maxim Integrated Products Inc. Микросхемы этой серии под общим названием «Системы нормирования сигнала датчиков» (СНСД, Sensor Signal Conditioners) реализуют новый подход к проблеме нормирования сигналов мостовых датчиков и автокомпенсации погрешностей измерения. Подробно рассмотрены уникальные программно-аппаратные методы фирмы Maxim. Приведен обзор технических характеристик моделей серии MAX14xx и рассмотрены новые разработки этой серии.**

**Виктор Алексеев**

victor@ecom-ic.ru

**Елена Ламберт**

elena@ecom-ic.ru

**Введение**

Одной из актуальных задач измерительной техники является точное и быстрое определение параметров различных физических величин. Классические методы измерения давления, температуры, ускорения, влажности и т. д. основаны на использовании датчиков с чувствительным элементом, изменяющим свое сопротивление под воздействием внешних факторов. Как правило, такие датчики включаются в измерительные устройства по стандартной мостовой схеме Уитстона. Поэтому в литературе приборы данного класса обычно называют мостовыми датчиками (МД).

Основными достоинствами этих датчиков является их простота, надежность, высокая чувствительность (не менее 10 мВ/В) и низкая стоимость. К основным недостаткам мостовых датчиков следует отнести нелинейную зависимость выходного сигнала от величины измеряемого физического параметра и большой температурный дрейф.

В настоящее время известно несколько удачных способов устранения этих недостатков мостовых датчиков.

Ведущие мировые производители разрабатывают и выпускают «интеллектуальные» системы сбора и обработки информации, основанные на сложных методах коррекции с применением оцифровки полезного сигнала и обработки информации с помощью встроенного микроконтроллера. Так, например, фирма Analog Devices предлагает использовать для подобных целей систему сбора и обработки информации в одном кристалле ADuC812, представляющую собой комбинацию 12-разрядного АЦП с 8-канальным мультиплексором, микроконтроллера 8051 с флэш-памятью и двух 12-разрядных ЦАП [1]. Фирма Motorola выпускает сложные измерительные микропроцессорные системы сбора и обработки информации AN1585 [2]. Фирма Burr-Brown предлагает решение этой проблемы в новой серии систем сбора информации ADS1250/ADS1252 [3]. Однако сравнительный анализ систем нормирования и систем сбора и обработки информации различных

фирм-производителей выходит за рамки данной статьи, поэтому мы ограничимся лишь приведенными выше ссылками.

Ниже рассматривается серия аналоговых интегральных схем фирмы Maxim, практически не имеющих конкурентов в своем сегменте рынка. Одно из приоритетных направлений деятельности компании направлено на разработку и изготовление миниатюрных, микромощных аналоговых интегральных схем повышенной надежности. Именно с этой точки зрения была поставлена задача нормирования сигнала МД при разработке новой серии.

Основная техническая идея, положенная в основу архитектуры базовых моделей этой серии, отражена в запатентованном фирмой Maxim методе, позволяющем нормировать сигналы мостовых датчиков без оцифровки с очень низкими погрешностями (0,1 %). Отказ от традиционных цифровых методов точной коррекции сигнала при помощи встроенных микроконтроллеров позволил фирме представить на рынке чисто аналоговые СНСД высокого класса точности в миниатюрных корпусах, с малым энергопотреблением и низкой стоимостью.

Первые микросхемы этой серии были разработаны для пьезорезистивных датчиков давления ПРДД. Более поздние модели являются универсальными и позволяют нормировать сигналы практически всех типов мостовых датчиков МД.

## **Коррекция нелинейности выходного сигнала и температурного дрейфа параметров датчиков в микросхемах серии MAX14xx**

Чувствительным элементом ПРДД является гибкая мембрана с нанесенным на нее пьезорезистивным слоем, изменяющим свое сопротивление при деформации. В измерительном модуле ПРДД включается по классической мостовой схеме.

На рис. 1 показана зависимость напряжения на выходе ПРДД от измеряемого давления при постоянной температуре. Напряжение смещения (Offset), полный рабочий диапазон (Full-Span Output) и пол-

ный диапазон (Full-Scale), рассматриваемые на рис. 1, являются функциями температуры.

Рассмотрим подробно метод коррекции погрешностей нормирования сигналов МД на примере MAX1457 и ПРДД, функциональная схема для которых приведена на рис. 2 [4].

Характерной особенностью ПРДД является сильная прямая зависимость сопротивления чувствительного элемента датчика от температуры (TCR). Поэтому при постоянном мостовом токе напряжение моста ( $V_{bd}$ ) увеличи-

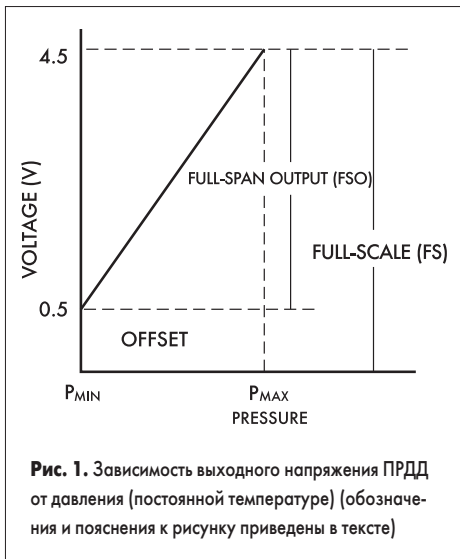


Рис. 1. Зависимость выходного напряжения ПРДД от давления (постоянной температуре) (обозначения и пояснения к рисунку приведены в тексте)

вается с ростом температуры. Эта зависимость  $V_{bd}$  от температуры может быть использована для компенсации температурного дрейфа параметров. ПРДД также имеет сильную обратную зависимость чувствительности датчика от температуры во всем рабочем диапазоне (TCS). Поэтому при постоянном мостовом токе полный рабочий диапазон (FSO) будет уменьшаться при увеличении температуры. Эти процессы приводят к возникновению значительных погрешностей измерения, обусловленных температурным дрейфом. Однако если ввести авторегулировку напряжения моста, которая позволяла бы увеличивать  $V_{bd}$  с увеличением температуры пропорционально температурному уменьшению TCS, то полный рабочий диапазон будет сохранять постоянное значение.

Наибольшую погрешность при обработке сигналов мостовых датчиков вносят напряжение смещения (Offset), температурный дрейф напряжения смещения (Offset TC), полный рабочий диапазон (FSO) и температурный дрейф полного рабочего диапазона (FSO TC).

Общий принцип коррекции погрешностей сигналов мостовых схем в серии MAX14xx сводится к простой формуле — «путем варьирования мостового тока и коэффициента усиления программируемого инструментального усилителя ПИУ (PGA) автоматически поддерживать строго линейную зависимость выходного сигнала от измеряемого давления во всем диапазоне температур и интервале измерений» [4].

Исполнительными элементами в MAX1457 являются 16-разрядные ЦАП, выходы которых активируются в соответствии с сигналами, поступающими от электронно-программируемого постоянного запоминающего

устройства EEPROM, через параллельный интерфейс (serial EEPROM, рис. 2).

В СНСД используется следующий алгоритм автоматической коррекции погрешностей. Первоначально при фиксированной температуре снимается зависимость выходного сигнала от измеряемого давления (на предприятии-изготовителе или непосредственно пользователем). При калибровке используется до 122 контрольных точек. Затем полученная кривая аппроксимируется с помощью кусочно-линейной функции, и коэффициенты аппроксимации в табличном виде записываются во внешнее EEPROM. На втором этапе калибровки снимаются экспериментальные кривые зависимости от температуры перечисленных выше параметров. Кривые аппроксимируются, и коэффициенты калибровки записываются в другие регистры EEPROM. В результате калибровки созда-

ются ступающими через интерфейс EEPROM из регистра памяти, в котором на этапе калибровки были сохранены коэффициенты аппроксимации. Величина тока моста регулируется путем выбора соответствующего калибровочного коэффициента.

Аналогичным образом, с использованием калибровочных коэффициентов из EEPROM, с помощью ЦАП (DAC-Offset TC), осуществляется коррекция температурного дрейфа смещения. Нелинейность полного рабочего диапазона корректируется за счет подачи на входы опорного источника ЦАП (DAC-FSO LIN) напряжения, пропорционального напряжению питания моста. Для коррекции нелинейности смещения и нелинейности полного рабочего диапазона используются ЦАП (DAC-FSO) и ЦАП (DAC-OFFSET).

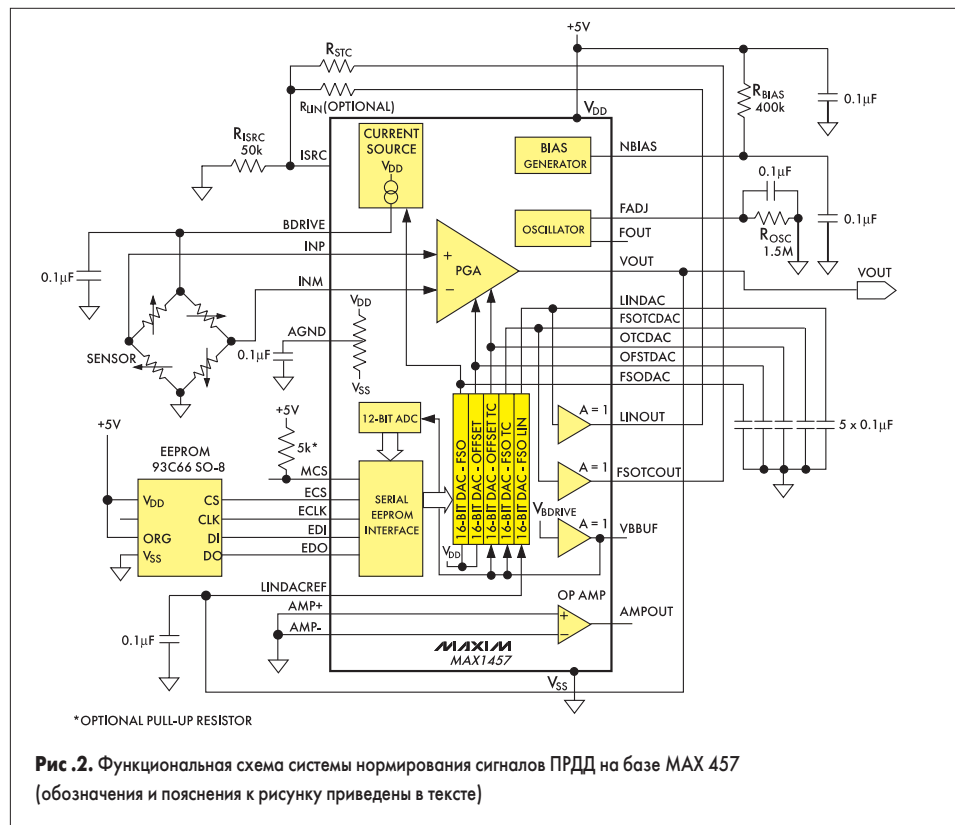


Рис. 2. Функциональная схема системы нормирования сигналов ПРДД на базе MAX 457 (обозначения и пояснения к рисунку приведены в тексте)

ется матрица параметров, характеризующая состояние схемы в 122 контрольных точках.

Через каждые 2 мс автоматически опрашиваются регистры EEPROM, определяется текущее состояние системы в контрольных точках, которое затем сравнивается с «идеальной» кривой. В результате этого сравнения выбираются необходимые корректирующие коэффициенты, управляющие выходами АЦП, и выдаются управляющие сигналы на регулируемый источник мостового тока (РИМТ) и на ПИУ. Подробно алгоритм коррекции описан в [5].

В схеме, приведенной на рис. 2, РИМТ (current source) через цепь обратной связи  $R_{stc}$  подключен к выходу 16-разрядного ЦАП (DAC-FSO TC), который является основным регулирующим элементом при коррекции температурного дрейфа полного рабочего диапазона.

Состояния выходов ЦАП (DAC-FSO TC) формируются в соответствии с сигналами, по-

на входы АЦП (ADC) поступает сигнал, пропорциональный напряжению моста. При этом на выходе АЦП формируются цифровые сигналы, подключающие к управляющим ЦАП соответствующие регистры EEPROM (с необходимыми для данного режима калибровочными коэффициентами).

Рассмотренный метод коррекции позволяет преобразовать сигнал датчика (с параметрами Offset = 16,4 мВ и FSO = 55,8 мВ) в нормализованный сигнал (с параметрами Offset = 0,50 В, амплитуда = 4,0 В) с погрешностью 0,1 % [5]. Более подробное описание метода коррекции приведено в [6–9].

#### Состав серии MAX14xx

Микросхемы серии различаются по классу точности, типу датчика, степени интеграции и автоматизации. Краткие технические характеристики СНСД серии MAX14xx приведены в табл. 1. Подробную техническую информацию можно найти на сайте [www.maxim-ic.com](http://www.maxim-ic.com).

Таблица 1. Системы нормирования сигналов серии MAX14xx

Тип	Относительная погрешность	Выходной сигнал датчика	Выходной сигнал ЧНСД	Метод преобразования сигнала	Схема компенсации	Интерфейс для программирования	Напряжение питания ( $\pm 10\%$ )	Встроенный ДООУСВ	Встроенное EEPROM
MAX1450*	1.0%	от 10 мВ/В до 30 мВ/В	от 0 до 5 В	Аналог	Резисторно-программируемый	Внешние резисторы или ЦАП	+5 В	Нет	Нет
MAX1452	0.25%	от 1 мВ/В до 40 мВ/В	от 0.5 до 4.5 В, от 0 до 5 В, от 2.5 до $\pm 2.5$ В, (4–20 мА)	Аналог	Управляющие 16-разр. ЦАП	Однопроводной	+5 В	Есть	Есть
MAX1455	0.25%	от 7 мВ/В до 40 мВ/В	от 0.5 до 4.5 В, от 0 до 5 В, от 2.5 до $\pm 2.5$ В	Аналог	Управляющие 16-разр. ЦАП	Однопроводной	+5 В	Нет	Есть
MAX1457*	0.1%	от 5 мВ/В до 30 мВ/В	от 0.5 до 4.5 В, от 0 до 5 В, (4–20 мА)	Аналог	Управляющие 16-разр. ЦАП	Последовательный	+5 В	Есть	Нет
MAX1458	1.0%	от 10 мВ/В до 40 мВ/В	от 0.5 до 4.5 В, от 0 до 5 В	Аналог	Управляющие 12-разр. ЦАП	Последовательный	+5 В	Нет	Есть
MAX1459	1.0%	от 10 мВ/В до 40 мВ/В	от 0 до 5 В, (4–20 мА)	Аналог	Управляющие 12-разр. ЦАП	Последовательный	+5 В	Есть	Есть
MAX1460**	–	от 4 мВ/В до 17 мВ/В	Цифра, параллельный Аналог от 0 до 5 В (4–20 мА)	Аналог-Цифра	Управляющие 12-разр. ЦАП + 16-разр. ЦСП	Последовательный	+5 В	Есть	Есть
MAX1462**	–	от 4 мВ/В до 17 мВ/В	Цифра, параллельный Аналог от 0 до 5 В (4–20 мА)	Аналог-Цифра	Управляющие 12-разр. ЦАП + 16-разр. ЦСП	Последовательный	+2.4 В	Есть	Есть
MAX1468**	–	Сигнал зарядо-чувств.-усил.	от 0.5 до 4.5В, от 0 до 5 В	Аналог-Цифра	Управляющие 12-разр. ЦАП + 16-разр. ЦСП	SPI	+5 В	Есть	Есть
MAX1478*	1.0%	от 10 мВ/В до 40 мВ/В	от 0.5 до 4.5 В, от 0 до 5 В	Аналог	Управляющие 12-разр. ЦАП	Последовательный	+5 В	Нет	Есть

**Примечания:**

\* — внешний температурный датчик;

\*\* — на базе цифрового сигнального процессора ЦСП (RISC).

Рассмотрим основные особенности микросхем, входящих в серию MAX14xx.

MAX1450 — это базовая модель, в состав которой входят РИМТ, 3-разрядный ПИУ, интерфейс для подключения внешних ЦАП и АЦП, выходной буферный каскад. Эта модель, специально разработанная для тензометрических датчиков, является наиболее простой по схемотехническому решению и относится к среднему классу точности (1 %).

MAX1452 является последней разработкой ЧНСД высокого класса точности (0,25 %), появившейся на рынке в начале 2001 г. Рассмотрим эту модель более подробно. Блок-схема MAX1452 приведена на рис. 3.

От рассмотренной выше MAX1457 интегральная схема MAX1452 отличается в основном тем, что имеет встроенный датчик температуры и встроенное EEPROM. Поэтому в этой ЧНСД используется несколько иная схема методики коррекции. В интегральной схеме MAX1452 текущее состояние системы определяется по результатам сравнения значений мгновенной температуры, измеряемой встроенным датчиком, с калибровочными значениями, хранящимися в EEPROM. Такой подход позволил использовать в MAX1452 встроенное EEPROM с меньшим числом регистров и сократить интервал опроса состояния системы до 1 мс.

MAX1452 позволяет нормировать сигналы датчиков в диапазоне от 1 до 40 мВ/В в стандартные сигналы, соответствующие протоколам:

- (4...20 мА);
- (0... +5 В) (Rail-to-Rail);
- (+0,5 ... +4,5 В) (Ratiometric);
- (+2,5...  $\pm 2,5$  В).

В состав MAX1452 входят РИМТ, 16-шаговый ПИУ, 768×8 бит EEPROM, четыре 16-разрядных ЦАП, датчик температуры, дополнительный операционный усилитель со свободными выходами ДООУСВ (используется для реализации дополнительных опций при подключении внешних компонентов).

Новые разработки, реализованные в этой модели, позволили получить уникальное значение погрешности смещения  $\pm 0,02$  %. ПИУ на основе КМОП-технологии обеспечивает точность подстройки смещения 3 мкВ в диапазоне  $\pm 150$  мВ.

Небольшой потребляемый ток (2 мА) и наличие ДООУСВ (AMP+, AMP-) дает возможность реализации выходного протокола (4...20 мА) и работы с питанием от токовой петли.

При соответствующем выборе схемы подключения ДООУСВ можно уменьшить ширину полосы пропускания (ниже 3,2 кГц). Это позволяет дополнительно повысить точность нормирования за счет частотной селекции входного сигнала.

Подключение двух внешних конденсаторов между выводами Vdd-Vss и Vss-OUT и двух внешних резисторов между выводами FSOTC-ISRC и ISRC-Vss позволяет формировать выходной сигнал с амплитудой, пропорциональной напряжению питания (ratiometric OUT).

Для построения калибровочной кривой может быть использовано до 114 контрольных точек с шагом 1,5 °С в интервале температур от -40 до +125 °С. Результаты калибровок записываются в 6 регистров EEPROM (768×8 бит) в виде 16-битового слова. Информация пользователя записывается в дополнительный регистр (52 байта). EEPROM содержит 12 независимо перезаписываемых страниц (по 64 байта каждая). Для программирования используется однопроводной интерфейс.

MAX1452 выпускается в корпусе SSOP-16, как в обычных упаковках, так и в упаковках для автоматического монтажа. Уникальные характеристики в сочетании с миниатюрным корпусом (габаритные размеры 6×5 мм) и малым энергопотреблением (2 мА) являются надежной рекомендацией для использования этой ЧНСД в переносной аппаратуре с батарейным питанием.

MAX1455 — дешевая универсальная ЧНСД высокого класса точности (0,25 %). Это новая разработка, которая в настоящее время про-

ходит тестовые испытания на предприятии-изготовителе. Maxim планирует выпустить эту модель в продажу в конце 2001 г. MAX1455 — это упрощенный, а поэтому и более дешевый вариант MAX1452. В частности, в MAX1455 нет ДООУСВ и соответствующих ему опций. В этой модели используются новые более дешевые сигма-дельта ЦАП. Одним из дополнительных преимуществ этой модели является высокая скорость программирования через однопроводной интерфейс (38 Кбит/с).

MAX1457 представляет собой прецизионную ЧНСД, позволяющую получить очень низкую относительную погрешность нормирования сигналов МД (0,1 %). Подробно работа этой модели была рассмотрена в разделе 1 данной статьи.

MAX1458/1459/1478 — дешевые, среднего класса точности (1 %), микромощные, миниатюрные ЧНСД, предназначенные для использования с кремниевыми ПРД и не требующие применения дополнительных внешних компонентов.

Каждая из этих ЧНСД представляет собой интегральную схему с четырьмя встроенными 12-разрядными сигма-дельта ЦАП, 3-разрядным дополнительным ЦАП, РИМТ, ПИУ, термодатчиком, согласующими резисторами и 128-разрядным EEPROM. Эти модели работают по принципу, аналогичному описанному выше. От других моделей серии эти три ЧНСД отличаются тем, что для подключения конкретных типов ПРД в них встроены программно-выбираемые резисторы, а для модуляции входного сигнала напряжением, пропорциональным смещению, используется дополнительный 3-разрядный ЦАП.

MAX1458/1459/1478 имеют ток потребления, равный соответственно 3 мА, 2 мА, 3 мА, и выпускаются в компактных корпусах SSOP.

На вход всех трех моделей может подаваться сигнал в диапазоне от +10 до +40 мВ/В.

Выходные сигналы у этих моделей разные. MAX1458 поддерживает выходное напряжение в диапазоне от 0,5 до 4,5 В. MAX1459 скон-



струирован для двухпроводного интерфейса (4...20 мА) и работы с питанием от токовой петли. MAX1478 имеет выход по напряжению Rail-to-Rail. Последние две СНСД представляют собой новые разработки, появившиеся на рынке в 2001 г.

MAX1460/1462/1468 — модели, которые входят за рамки рассматриваемого в данной статье класса аналоговых СНСД, поскольку представляют отдельное направление систем сбора и обработки на базе RISC-процессоров [9, 10].

В интегральных схемах MAX1460/1462/1468 аналоговый сигнал датчика корректируется по описанной выше методике, с использованием РИМТ, ПИУ, 12-разрядного ЦАП, ДОУСВ. Затем этот скорректированный сигнал оцифровывается и загружается в соответствующие регистры 16-разрядного цифрового сигнального процессора (ЦСП). В другие регистры записываются цифровые сигналы со встроенного температурного датчика и EEPROM, в котором хранятся калибровочные коэффициенты.

Выходной сигнал может быть получен либо в цифровой форме в виде 12-разрядного слова, либо в виде аналогового сигнала (4...20 мА).

MAX1468 — одна из последних разработок фирмы Maxim, проанонсированная в начале 2001 г. Сейчас микросхема проходит тестовые испытания на предприятии-изготовителе [10]. Эта модель, предназначенная специально для

работы с емкостными датчиками и питанием от 2,4 В, может быть рекомендована для использования в переносной аппаратуре медицинского, научного и промышленного назначения (автоматические гигрометры, приборы для экспресс-анализа крови, автомобильные датчики контроля бортовых параметров и т. д.).

В состав серии MAX14xx входит программируемый кварцевый диэлектрический конденсатор MAX1474, предназначенный для согласования емкостных датчиков с другими моделями СНСД. Эта интегральная схема позволяет получать дискретные значения емкости в диапазоне от 6,4 до 13,3 пФ через каждые 0,22 пФ с очень низким коэффициентом температурного дрейфа (меньше  $33 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ).

В заключение этого раздела следует подчеркнуть, что Maxim уделяет очень большое внимание технической поддержке серии MAX14xx.

Библиотека баз данных фирмы MAXIM в настоящее время содержит информацию, необходимую для калибровки более 2000 комбинаций наиболее распространенных мостовых датчиков и интегральных схем серии MAX14xx. Поэтому, по желанию пользователя, калибровка может быть проведена для конкретного типа датчика по предлагаемому фирмой перечню.

Калибровка и настройка может проводиться также пользователем самостоятельно.

Для каждой интегральной схемы этой серии Maxim выпускает отладочные комплекты (MAX14xxEVKIT), в состав которых входят отладочная плата с датчиком, полный комплект документации и ПО, интерфейсы для связи с внешним компьютером.

Кроме того, для серии MAX14xx выпускаются контрольно-испытательные станции (14xxDASBOARD), предназначенные для калибровки и настройки в автоматическом режиме 112 СНСД одновременно. 14xxDASH BOARD поставляется как с универсальным шинным интерфейсом (GPIB, IEEE-488), так и с последовательным интерфейсом RS-232.

### Заключение

Рассмотренные ИС серии MAX14xx обладают соотношением «технические характеристики/энергопотребление/размеры/цена», которое может удовлетворить самым взыскательным требованиям, предъявляемым к современным средствам измерения сигналов МД. Описанный метод, запатентованный фирмой Maxim, по мнению авторов, позволяет корректировать погрешности нормирования сигналов в 4–5 раз эффективнее по сравнению с известными пассивными методами [4]. Поэтому микросхемы серии MAX14xx в последнее время все чаще используются в новых разработках [7, 10].

### Литература

- ADuC812- MicroConverter, Multichannel 12-bit ADC with Embedded Flash MCU, Rev. 05/99, Analog Devices, Inc.
- E. Jacobsen, J. Baum. AN1585, High-Performance, Dynamically-Compensated Smart Sensor System. Motorola Sensor Device Data-AN1585/D, 1997.
- Data-Acquisition Products, SINE ON, Issue 1, 4Q, p. 2, 2000.
- New Ics revolutionize the sensor interface. MAXIM Engineering Journal, v 32, pp. 3–8.
- MAX1457, 0.1%-Accurate Signal Conditioner for Piezoresistive Sensor. MAXIM, New Releases Data Book, v. 8, 13–13, 1999.
- MAX1450, Low-Cost, 1%-Accurate Signal Conditioner for Piezoresistive Sensor. MAXIM, New Releases Data Book, v. 8, 13–3, 1999.
- Konrad A., Ashauer C., Intelligent IC Conditions Pressure-Sensor Signals, Proc. «Sensor Expo in Cleveland», Ohio, September 14–16, 1999.
- Evaluation Kit for the MAX1457, MAXIM, New Releases Data Book, v. 9, 14–2, 2000.
- Signal-Conditioner IC. 16-bit signal conditioner for smart sensors, operates at 2.4 V, MAX1462. Maxim Engineering Journal, v 40, p. 19. 2001.
- Fully Digital Signal Path Provides Unparalleled Accuracy for Capacitive Sensors — MAX1468. MAXIM Integrated Products Inc. SIGNAL CONDITIONERS. Analog Design Guide. # 14, 2-nd edition, p.3 2001.

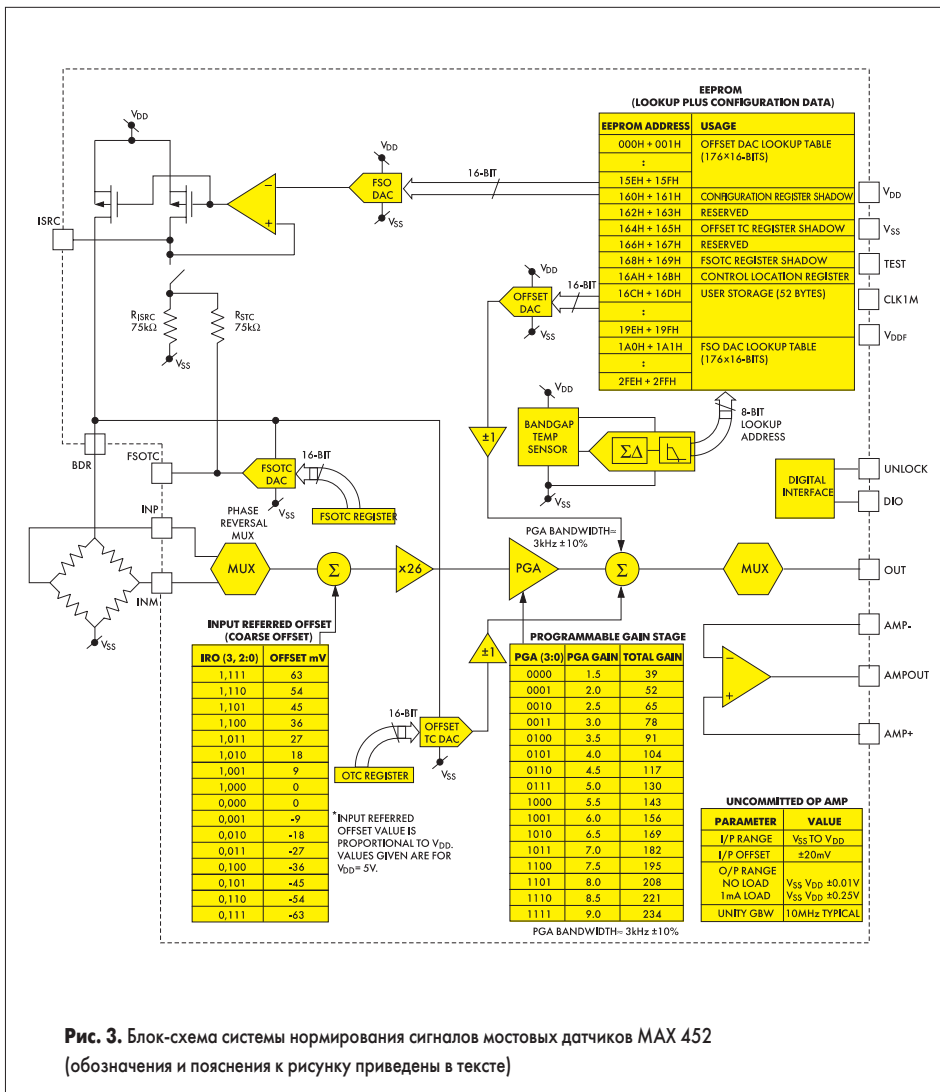


Рис. 3. Блок-схема системы нормирования сигналов мостовых датчиков MAX 452 (обозначения и пояснения к рисунку приведены в тексте)