

# Формирователи сигналов датчиков Maxim

**Проведение любых измерений предполагает наличие трех основных составляющих: датчика, формирователя сигналов с этого датчика и устройства обработки сформированного сигнала (в любой вид — от цифрового сигнала до вывода на дисплей). То, что основные параметры измерения определяются датчиком, понятно, как, впрочем, и то, что сформированный (нормированный) сигнал можно преобразовать во что угодно и как угодно (и без особых проблем). Остается середина — формирователь, и что бы эта середина не стала золотой (в смысле затраченных денег и времени) и не была основным источником погрешности, необходимо очень тщательно подойти к вопросу выбора формирователя сигналов датчика.**

**Н.Н. Ракович**

info@rainbow.msk.ru

Опыт разработки любой системы, в состав которой входят датчики, показывает, что наибольшие проблемы возникают при обработке сигнала с практически любого датчика (конечные выключатели здесь не рассматриваются).

На этом этапе необходимо маломощный аналоговый сигнал датчика преобразовать в сигнал, пригодный для подачи на вход АЦП, то есть преобразовать нелинейную вольтамперную характеристику датчика в линейную с температурной компенсацией (основное назначение формирователя). Эта задача может решаться различными путями — на транзисторах (для тех, кто тяготеет к антиквариату), на быстродействующих ОУ (способ неплохой, но не лучший: громоздкая схема, сложность настройки) и применение готовых формирователей сигналов датчиков (помогут избавиться от лишней головной боли при разработке).

Исходя из этого, рассмотрим формирователи именно с этих позиций: термокомпенсация и линейность выходной характеристики.

В качестве примера остановимся на семействе преобразователей MAX14xx, которые выпускает один из гигантов электронной комплектации MAXIM. В состав семейства входят формирователи, предназначенные для работы в первую очередь с пьезорезистивными датчиками давления и ускорения: MAX1450, 1452, 1455, 1457, 1458, 1478. В эту же серию входит и «интеллектуальный» аналого-цифровой преобразователь MAX1460 (его описание планируется в следующей статье).

Начнем с младшей модели MAX1450. Формирователь MAX1450 предназначен для работы с пьезорезистивными датчиками давления и ускорения, промышленными датчиками давления, датчиками давления в манифольде буровых насосов, в автомобильных системах, гидравлических системах. Поэтому MAX1450 оптимизирован для калибровки и температурной компенсации пьезорезистивных датчиков.

Формирователь состоит из регулируемого источника тока для питания датчика и усилителя с программируемым коэффициентом усиления на 3 разряда (PGA) (рис. 1). При общей суммарной ошибке в 1% формирователь компенсирует начальное смещение, выход полного диапазона (FSO), температурный коэффициент начального смещения, температурный коэффициент FSO и нелинейность выхода полного диапазона кремниевых пьезорезистивных датчиков с помощью внешних подстроечных резисторов, потенциометров или ЦАП (исходя из конкретного задания и пристрастий разработчика).

Все вышперечисленное делает формирователь MAX1450 практически идеальным (в том числе и по стоимости) для использования в недорогих измерительных устройствах средней точности. Хотя MAX1450 оптимизирован для работы с пьезорезистивными датчиками, однако он может работать

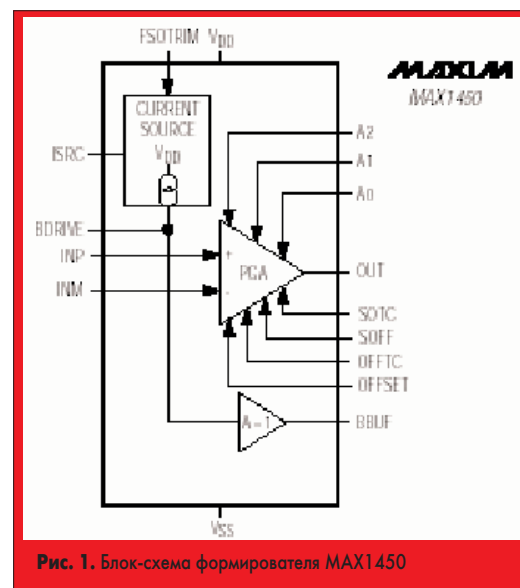


Рис. 1. Блок-схема формирователя MAX1450

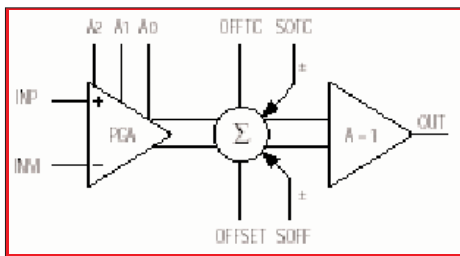


Рис. 2. Аналоговый тракт MAX1452

и с другими типами резистивных датчиков (например, с тензодатчиками).

Сигнал с датчика (дифференциальный) поступает на вход усилителя с программируемым коэффициентом усиления (3 разряда позволяют получить коэффициенты усиления: 39, 65, 91, 117, 143, 169, 195 и 221), причем коэффициент ослабления синфазного сигнала составляет 90 дБ (структурная схема MAX1450 на рис. 2), а диапазон входного сигнала — от нуля до напряжения питания.

С выхода усилителя аналоговый сигнал поступает на сумматор, на который также подается напряжение смещения  $V_{offset}$  и напряжение компенсации температурного смещения  $V_{offic}$ . Эти напряжения складываются или вычитаются из аналогового сигнала в зависимости от своих знаков, которые также поступают на сумматор.

Буферный каскад после сумматора формирует сигнал полного диапазона с размахом от 250 мВ до напряжения источника питания — 250 мВ при токе нагрузки до 1 мА, при отсутствии нагрузки — от 50 мВ до  $U_{пит}$  — 50 мВ.

**Схема включения.** Для измерения используется мостовая схема включения датчика, позволяющая выполнять наиболее точные измерения сопротивления (рис. 3). Питание моста осуществляется встроенным источником тока, а номинальный ток  $I_{ISRC}$  определяется напряжением  $F_{SOTRIM}$  и резистором  $R_{ISRC}$  и, в свою очередь, определяет выход полного диапазона FSO (рис. 4). Ток  $I_{ISRC}$  дополнительно модулируется выходным напряжением буфера (внешний резистор  $R_{STC}$ ) для компенсации погрешности температурного коэффициента FSO и выходным напряжением ИС для компенсации нелинейности FSO (внешний резистор  $R_{LIN}$ ).

Чтобы иметь представление о работе формирователя MAX1450, рассмотрим примене-

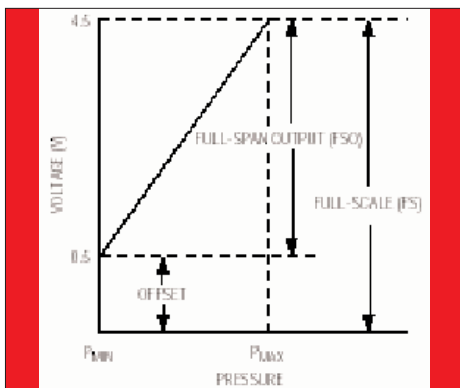


Рис. 4. Типовая выходная характеристика пьезорезистивного датчика

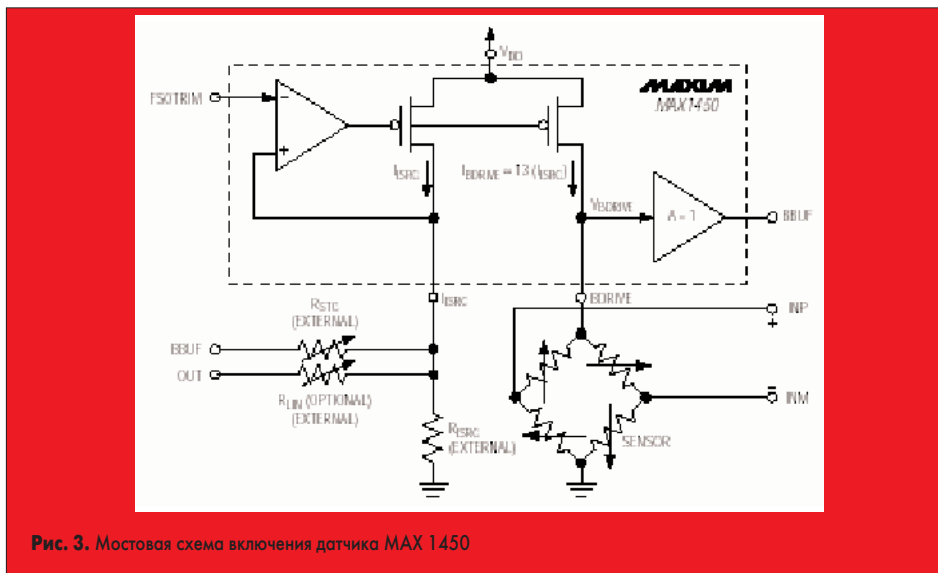


Рис. 3. Мостовая схема включения датчика MAX1450

ние процедуры температурной компенсации и калировки сигнала датчика на простом примере. Пусть напряжение смещения при минимальном давлении  $V_{out}(P_{min})$  составляет 0,5 В, а требуемый выход полного диапазона (разница напряжений при максимальном и минимальном давлении  $V_{out}(P_{max}) - V_{out}(P_{min})$ ) — 4 В. Таким образом, напряжение полного диапазона при максимальном давлении составит 4,5 В (рис. 4). Кроме этих данных потребуются два значения давления (для нуля и максимума шкалы) и две температуры. При этом типовая процедура компенсации (температурная компенсация и калировка точек смещения и выхода полного диапазона) состоит из следующих этапов:

1. Определение начальных значений.
2. Калировка FSO (полного диапазона).
3. Компенсация температурного коэффициента FSO.
4. Компенсация температурного коэффициента напряжения смещения (OFFSET).
5. Калировка напряжения смещения.
6. Калировка линейности.

Под определением начальных значений подразумевается выбор сопротивлений резисторов  $R_{ISRC}$  и  $R_{STC}$ , коэффициента усиления PGA и начального значения смещения для устранения значительной перегрузки PGA и источника тока. Все эти величины зависят от параметров конкретного датчика и, соответственно, для их расчета необходимы эти самые параметры (таблица 1). Не останавливаясь на методиках и формулах расчета ком-

пенсации температурной погрешности (они предельно просты), скажем два слова о калировке линейности.

**Калировка линейности** применяется случае, если при постоянном токе измерительного моста выходное напряжение изменяется нелинейно с приложенным давлением (например, увеличивается быстрее, чем растет давление). Коррекция линейности с использованием функции передачи непрактична, так как ряд необходимых системных переменных сложно измерить с достаточной степенью точности. Поэтому применяется простой эмпирический подход, который заключается в подборе резистора  $R_{LIN}$ . На рис. 5 показана погрешность нелинейности при различных значениях  $R_{LIN}$ .

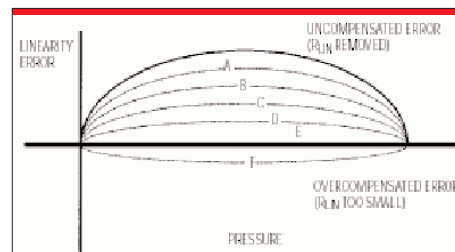


Рис. 5. Зависимость погрешности нелинейности от  $R_{LIN}$

В MAX 1450 реализовано **конфигурирование выходного сигнала**, при котором он пропорционален напряжению источника питания. Это позволяет обеспечить независимость цифровых данных от источника питания при использовании параметрических АЦ-преобразователей (такой выход необходим в большинстве применений в автомобильном производстве и некоторых отраслях промышленности). На рис. 6 приведена схема конфигурирования выходного сигнала с минимальным числом внешних элементов.

Применение MAX1450 с соответствующей калировкой и компенсацией позволяет получить из пьезорезистивного датчика (со своей специфической характеристикой) компенсированный преобразователь с нормализованным выходом. В качестве примера на рис. 7 показаны зависимости погрешности от температуры для датчика без компенса-

Таблица 1. Параметры датчика

Параметр	Описание	Типовое значение
$R_b(T)$	Импеданс входа-выхода	5 кОм при +25 °С
TCR	ТКС входа-выхода	2600 ppm/°С
S(T)	Чувствительность	1,5 мВ/В при +25 °С
TCS	ТК чувствительности	-2100 ppm/°С
O(T)	Смещение	12 мВ/В при +25 °С
OTC	ТК смещения	-1030 ppm - FSO/°С
S(p)	Нелинейность чувствительности	0,1% FSO
$P_{min}$	Минимальное измеряемое давление	0 Н/м <sup>2</sup>
$P_{max}$	Максимальное измеряемое давление	68950 Н/м <sup>2</sup>

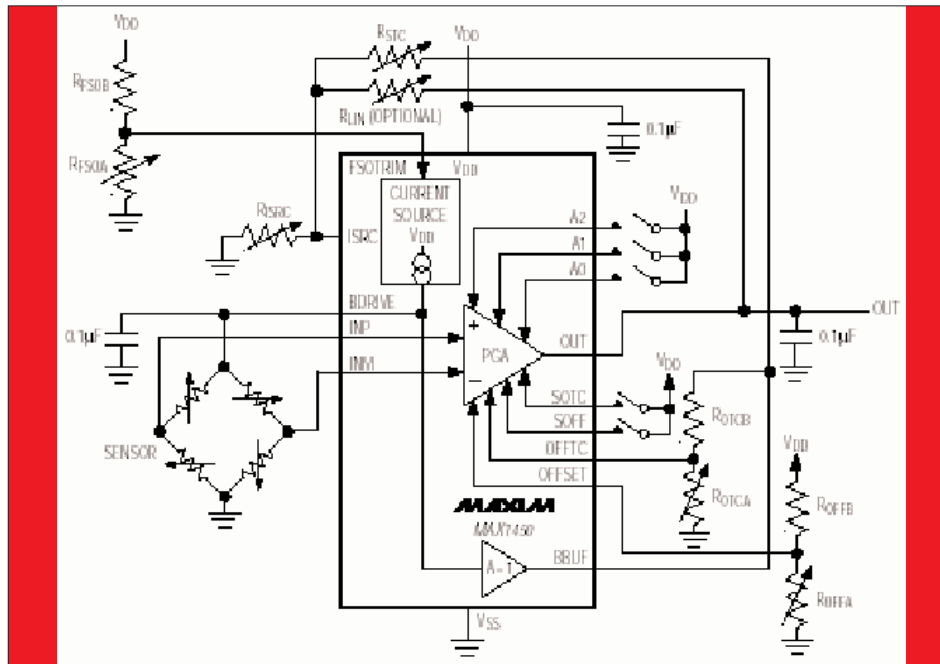


Рис. 6. Схема конфигурирования выходного сигнала с минимальным числом внешних элементов

либровка и компенсация, окончательная проверка.

Как и MAX1450, MAX1458 и MAX1478 имеют аналоговый тракт усиления сигнала датчика. Но кроме грубой подстройки смещения в диапазоне  $\pm 63$  мВ (с шагом 9 мВ) в этих формирователях реализована и точная подстройка с помощью ЦАП смещения с шагом 2,8 мВ. Источник тока измерительного моста программируется от 0,1 до 2 мА. Как уже упоминалось, в 128-разрядной памяти в виде 12-разрядных слов хранятся коэффициенты калибровки и компенсации и не только они:

- регистр конфигурации;
- коэффициент калибровки смещения;
- коэффициент компенсации температурной погрешности смещения;
- коэффициент калибровки выхода полного диапазона;
- коэффициент компенсации температурной погрешности выхода полного диапазона;
- 24 разряда для пользователя (чтобы записать, что хочется — хоть серийный номер, хоть дату).

**Компенсация температурной погрешности сигнала полного выхода.** Компенсация температурной погрешности основана на физических свойствах кремниевых датчиков (они же кремниевые пьезорезистивные преобразователи — PRT). PRT обладают большим положительным ТКС, то есть при неизменном токе напряжение измерительного моста увеличивается с ростом температуры. Одновременно с этим отрицательный температурный коэффициент чувствительности FSO кремниевых датчиков приводит к уменьшению выхода полного диапазона при росте температуры. В обоих случаях имеем температурные погрешности. Однако если напряжение измерительного моста будет увеличиваться с ростом температуры с такой же скоростью, что и снижение чувствительности, то выход полного диапазона будет оставаться неизменным при любых изменениях температуры. На этом принципе и основана термокомпенсация FSO. Реализация этого осуществляется резистором  $R_{FTC}$  и цифро-аналоговым преобразователем FSOTC (рис. 8), который модулирует ток через резистор  $R_{FTC}$  как функцию температуры. ЦАП FSOTC устанавливает  $V_{ISRC}$  и поддерживает его постоянным при изменениях температуры, в то время как напряжение на FSOTC (буферный выход ЦАП FSOTC) изменяется с температурой. Опорным напряжением для ЦАП служит напряжение моста  $V_{BDRIVE}$ , которое также зависит от температуры. Цифро-аналоговый преобразователь FSOTC изменяет температурный коэффициент источника тока. Как только температурный коэффициент напряжения измерительного моста равен по величине и противоположен по знаку температурному коэффициенту чувствительности, температурная погрешность компенсируется и выход полного диапазона остается неизменным при изменении температуры.

**Термокомпенсация смещения.** Компенсация погрешности смещения, возникающей

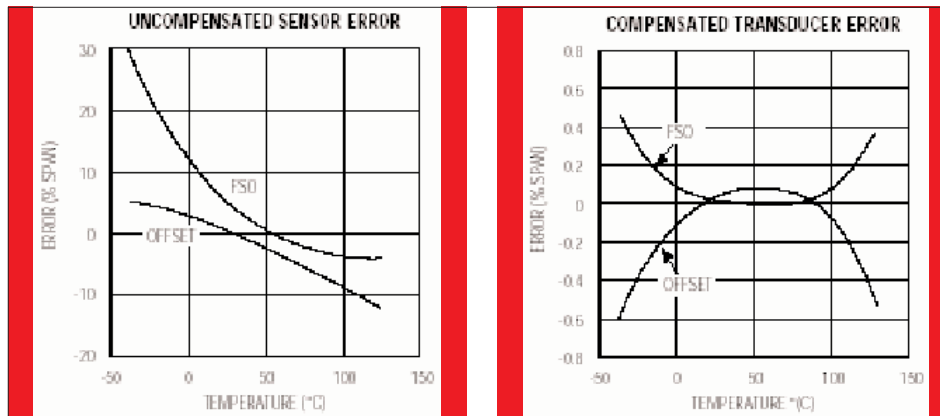


Рис. 7. Зависимости погрешности от температуры для датчика без компенсации (начальное смещение 30 мВ и полный размах 37,5 мВ) и компенсированного преобразователя (смещение 0,5 В и полный размах 4,0В)

ции (начальное смещение 30 мВ и полный размах 37,5 мВ) и компенсированного преобразователя (смещение 0,5 В и полный размах 4,0 В), а в таблице 2 — сравнение выходного сигнала датчика и сигнала с выхода формирователя.

Таблица 2. Калибровка и компенсация MAX1450

Типовые параметры датчика	Типовые параметры на выходе формирователя
Смещение	80% FSO
Выход полного диапазона (FSO)	15 мВ/В
ТК смещения	-17% FSO
Нелинейность ТК смещения	1% FSO
ТК выхода полного диапазона	-35% FSO
Нелинейность ТК выхода полного диапазона	1% FSO
Температурный диапазон	-40 ... +125 °C

Дальнейшим развитием преобразователей для пьезорезистивных датчиков являются MAX1458 и MAX1478. При использовании этих ИС отпадает необходимость в точных элементах и применении потенциометров — все коэффициенты калибровки и компенсации хранятся во внутреннем ЭСППЗУ (128 разрядов). А если к этому добавить четыре 12-разрядных цифро-аналоговых преобразователя, то мы получаем очень и очень неплохой формирователь. Поскольку отличие MAX1478 от MAX1458 заключается в наличии выходного сигнала с размахом напряжения питания и меньшем разбросе перепада выходного напряжения (0,05 для MAX1478 и 0,1 для MAX1458), то в дальнейшем считаем оба формирователя идентичными (за исключением, конечно, этих двух параметров).

Калибровка и компенсация температурной погрешности в MAX1458 и MAX1478 выполняется подстройкой смещения и диапазона входного сигнала с помощью ЦАП, что устраняет шумы квантования. Встроенные функции тестирования позволяют объединить в одном автоматизированном процессе три обычных операции изготовителей датчиков: предварительное тестирование, ка-

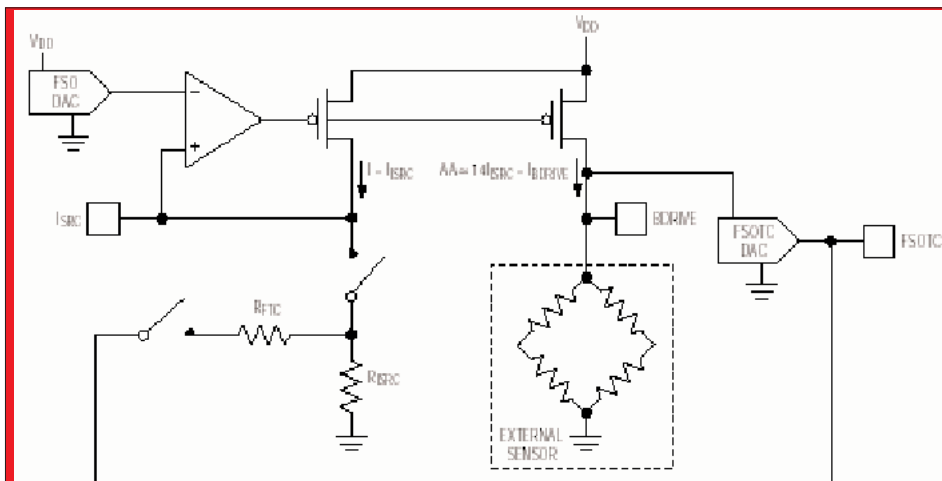


Рис. 8. Схема термокомпенсации FSO

из-за температурного дрейфа, выполняется в два приема. Сначала измеряется погрешность смещения без компенсации. После этого определяется величина напряжения  $V_{BDRIVE}$ , зависящего от температуры, и добавляется в выходной сумматор для уменьшения погрешности (для этого используется ЦАП смещения Offset TC — рис. 9).

**Аналоговый тракт сигнала** MAX1458 и MAX1478, в отличие от MAX 1450, состоит из 4 каскадов (рис. 9):

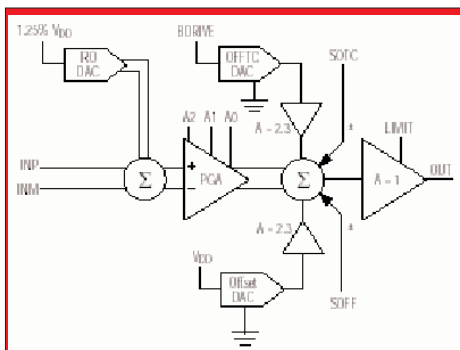


Рис. 9. Блок-схема аналогового тракта MAX1458 и MAX147

- входной сумматор для предварительной коррекции смещения;
- 3-разрядный усилитель с программируемым коэффициентом усиления от 41 до 230;
- сумматор на три входа;
- выходной усилитель.

Сигнал с датчика поступает на входной сумматор (КОСС > 90 дБ, входное сопротивление порядка 1 МОм, диапазон входного сигнала от нуля до напряжения питания). Кроме сигнала с датчика на сумматор подает-

ся напряжение предварительной коррекции смещения, которое формируется 3,5-разрядным ЦАП IRO. Опорное напряжение этого ЦАП составляет 1,25% от напряжения питания, то есть при напряжении питания 5 В диапазон коррекции смещения составляет от -63 до +63 мВ с шагом 9 мВ. Значения управляющих битов задаются в регистре конфигурации.

Дальнейший путь прохождения сигнала похож на MAX 1450.

#### Цифро-аналоговые преобразователи.

В состав MAX1458 и MAX1478 входят четыре 12-разрядных дельта-сигма цифро-аналоговых преобразователя со временем преобразования менее 100 мс. Каждый из ЦАП имеет соответствующий регистр памяти в ЭСПЗУ для хранения коэффициентов коррекции.

ЦАП FSO (выхода полного диапазона) применяется для настройки FSO. Этот ЦАП управляет напряжением  $V_{ISRC}$ , которое совместно с  $R_{ISRC}$  задает ток датчика. В качестве опорного напряжения используется напряжение питания. Оно же служит опорным и для ЦАП смещения, который обеспечивает разрешение 1,22 мВ при напряжении питания 5 В. Выход ЦАП смещения подключен к выходному сумматору с коэффициентом усиления 2,3, что увеличивает разрешение коррекции смещения до 2,8 мВ.

В ЦАП смещения Offset TC и ЦАП FSOTC в качестве опорного напряжения применяется напряжение BDRIVE, зависящее от температуры. При номинальном значении  $V_{BDRIVE}$  в 2,5 В разрешение составляет 0,6 мВ. ЦАП Offset TC также подключается к выходному сумматору. Сигнал с выхода ЦАП FSOTC поступает на ISRC через  $R_{FTC}$  для коррекции по-

Таблица 3. Регистр конфигурации MAX1458/MAX1478

Адрес	Описание
00H	Бит знака ТК смещения
01H	Бит знака смещения
02H	Коэффициент усиления (младший разряд), A2
03H	Коэффициент усиления, A1
04H	Коэффициент усиления (старший разряд), A0
05H	Резерв
06H	Резерв
07H	Выбор встроенного резистора ( $R_{ISRC}$ , $R_{FTC}$ )
08H	Бит знака предварительной коррекции смещения
09H	Предварительная коррекция смещения (младший разряд)
0AH	Предварительная коррекция смещения
0BH	Предварительная коррекция смещения (старший разряд)

грешности температурного коэффициента выхода полного диапазона.

**Внутренние резисторы.** MAX1458 и MAX1478 содержат три внутренних резистора ( $R_{ISRC}$ ,  $R_{FTC}$ ,  $R_{TEMP}$ ), которые оптимизированы для наиболее распространенных кремниевых пьезорезистивных датчиков.  $R_{ISRC}$  вместе с ЦАП FSO определяет номинальный ток датчика.  $R_{FTC}$  и ЦАП FSOTC компенсируют температурную погрешность выхода полного диапазона. Номинальное значение этих двух резисторов составляет 75 кОм. При использовании внешних резисторов  $R_{FTC}$  и  $R_{ISRC}$  могут быть отключены установкой соответствующего бита в регистре конфигурации (таблица 3).

$R_{TEMP}$  — резистор с номинальным сопротивлением 100 кОм при +25 °C и температурным коэффициентом +4600 ppm/°C, применяемый с датчиками, для которых требуется внешний датчик температуры.

**ЭСПЗУ.** Микросхемы MAX1458 и MAX1478 имеют внутреннюю память объемом 128 бит, организованную в восемь слов по 16 бит каждое. Четыре старших бита в каждом регистре — резерв. Состав памяти:

- регистр конфигурации;
- 12-разрядные коэффициенты калибровки для ЦАП смещения и FSO;
- 12-разрядные коэффициенты компенсации для ЦАП Offset TC и ЦАП FSOTC;
- два регистра общего назначения для хранения информации пользователя (серийный номер, дата, контрольная сумма);
- резервный регистр.

Программирование памяти выполняется по 1 биту за такт. Адреса битов — от 0 до 127 (7Fh).

В следующей статье мы рассмотрим формирователи фирмы MAXIM, которые определяются как процессоры обработки аналоговых сигналов резистивных датчиков. ■