

# Новейшие операционные усилители Texas Instruments с программируемым коэффициентом усиления и мультиплексором

Виталий БЕРЕЛИДЗЕ  
berelidze@compel.ru

В статье рассмотрены новинки аналоговой техники — микросхемы усилителей с программируемым усилением и входным многоканальным мультиплексором.

Операционные и инструментальные усилители от Texas Instruments, в том числе и прецизионные, разработкой и производством которых заняты всего несколько производителей, известны и востребованы разработчиками. Недавно семейство прецизионных аналоговых интегральных микросхем фирмы пополнилось новой серией.

PGA112, PGA113 и PGA116, PGA117 представляют собой комбинацию одноходового усилителя с однополярным питанием и программируемым усилением (PGA) и входного мультиплексора. PGA112 и PGA113 имеют двухканальный мультиплексор и программное выключение для экономии электроэнергии, в PGA116 и PGA117 — 10-канальный мультиплексор, а отключение как программное, так и аппаратное. В PGA112 и PGA116 усиление выбирается из ряда (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128), а в PGA113 и PGA117 — из ряда (1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200).

Выбор канала мультиплексора и установка усиления выполняются через стандартный

SPI-интерфейс. PGA112, PGA113 имеют 3-проводный SPI цифровой интерфейс, а PGA116, PGA117 — 4-проводный SPI цифровой интерфейс с возможностью последовательного соединения по шине данных.

Области применения микросхем: дистанционное измерение электрических сигналов, портативные устройства сбора данных, системы сбора данных под управлением персонального компьютера, тестовое оборудование, программируемые логические контроллеры, устройства с автоматическим управлением усилением, устройства с батарейным питанием.

PGA112 и PGA113 конструктивно выполнены в корпусе MSOP-10, PGA116 и PGA117 — в корпусе TSSOP-20.

Основные электрические характеристики микросхем приведены в таблице 1, а функциональные схемы усилителей PGA112, PGA113 и PGA116, PGA117 изображены на рис. 1–2.

Во всех моделях используется раздельное питание аналоговой части  $AV_{DD}$  и ци-

фровой части  $DV_{DD}$ . Такая расщепленная архитектура питания позволяет упростить соединение с аналого-цифровыми преобразователями и микроконтроллерами в системах со смешанным питанием, например, в тех, где аналоговое питание  $AV_{DD} = +5$  В, а цифровое питание  $DV_{DD} = +3$  В. Аналоговый выходной каскад PGA и схема SPI цифрового интерфейса SPI питаются от  $DV_{DD}$ . Для нормальной работы микросхем  $DV_{DD}$  должно быть меньше или равно  $AV_{DD} + 0,3$  В. После подачи питания PGA устанавливается в состояние с  $G = 1$  и активным каналом CH0.

Четыре внутренних калибровочных канала предназначены для системной калибровки. Каналы подключены к GND,  $0,9V_{CAL}$ ,  $0,1V_{CAL}$  и  $V_{REF}$  соответственно.  $V_{CAL}$  — внешнее напряжение, подключаемое к входу  $V_{CAL}/CH0$ , служит опорным при системной калибровке. Если  $V_{CAL}$  — опорное напряжение системного АЦП, калибровка усиления и смещения АЦП легко обеспечиваются через PGA с использованием только одного входа мультиплексора. Если калибровка не применяется, то  $V_{CAL}/CH0$  может использоваться как стандартный вход мультиплексора. Все четыре версии имеют вывод  $V_{REF}$ , который может быть подключен к «земле» (рис. 2) или к средней точке питания в системах с однополярным питанием, в которых средняя точка питания используется в качестве виртуальной «земли» (рис. 1).

Усилитель с программируемым усилением представляет собой операционное устройство с однополярным питанием и rail-to-rail входом и выходом (RRIO). Чтобы обеспечить диапазон изменения входного напряжения от нуля и до напряжения питания, на входе использованы два параллельно включенных входных каскада. Как показано на рис. 3, на каждом входе есть  $p$ -ка-

Таблица 1. Электрические характеристики при напряжении питания +5 В

Напряжение смещения нуля $V_{OS}$ , мкВ	$V_{CM} = 2,5$ В		±25	±100
	$V_{CM} = 4,5$ В		±75	±325
Температурный дрейф смещения нуля $dV_{OS}/dT$ , мкВ/°С	$V_{CM} = 2,5$ В		0,35	1,2
	$V_{CM} = 4,5$ В		0,6	1,8
Входной ток канала $I_{IN}$ , нА			±1,5	±5
Диапазон входного напряжения $V_{IN}$ , В		GND–0,1		$AV_{DD} + 0,1$
Номинальное усиление $G$	1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128	1		128
	1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200	1		200
Погрешность усиления, %	$G = 1$		0,006	0,1
	$1 < G < 32$			0,1
	$G > 50$			0,3
Температурный дрейф усиления, ppm/°С	$G = 1$		0,5	
	$1 < G < 32$		2	
	$G > 50$		6	
Погрешность передачи каналов CAL2 и CAL3, %			0,02	
Диапазон выходного напряжения $V_{OUT}$ , В	$I_{OUT} = \pm 0,25$ мА	GND+0,05		$DV_{DD} - 0,05$
Напряжение питания $AV_{DD}$ , В		2,2		5,5
Напряжение питания $DV_{DD}$ , В		2,2		5,5
Ток, потребляемый аналоговой частью $I_{QA}$ , мА			0,3	0,45
Ток, потребляемый цифровой частью $I_{QD}$ , мА			0,75	1,2

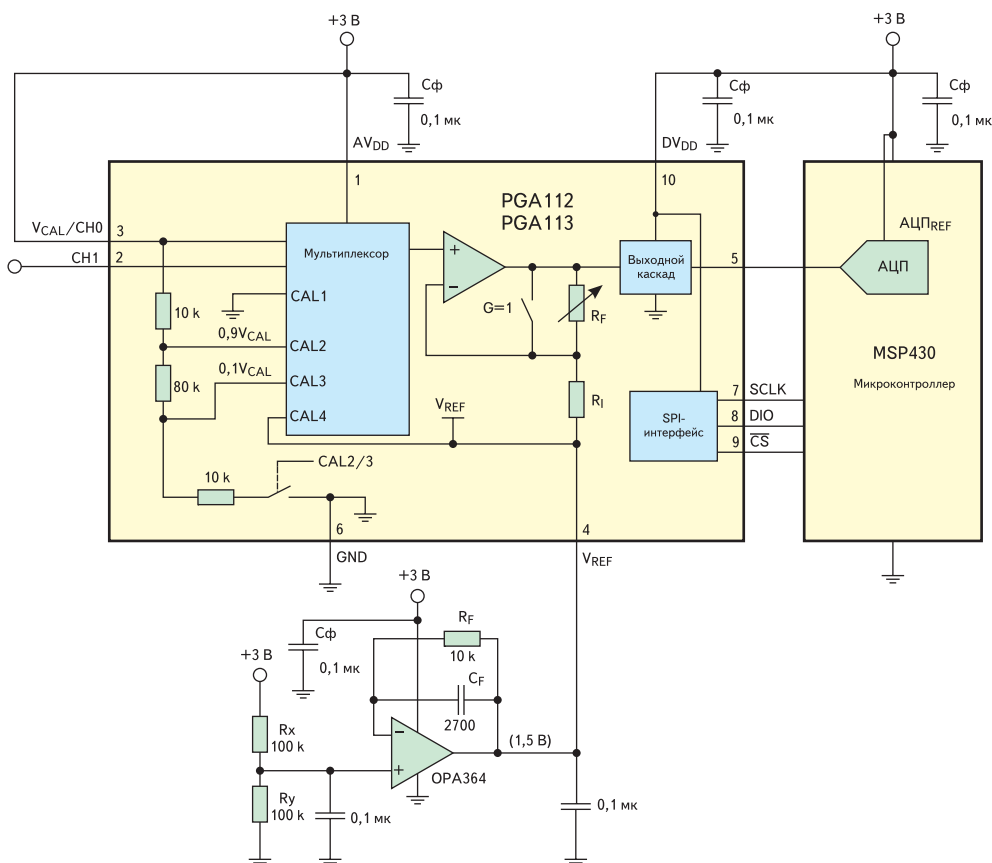


Рис. 1. Применение PGA112, PGA113 с калировкой при  $V_{REF} = AV_{DD}/2$

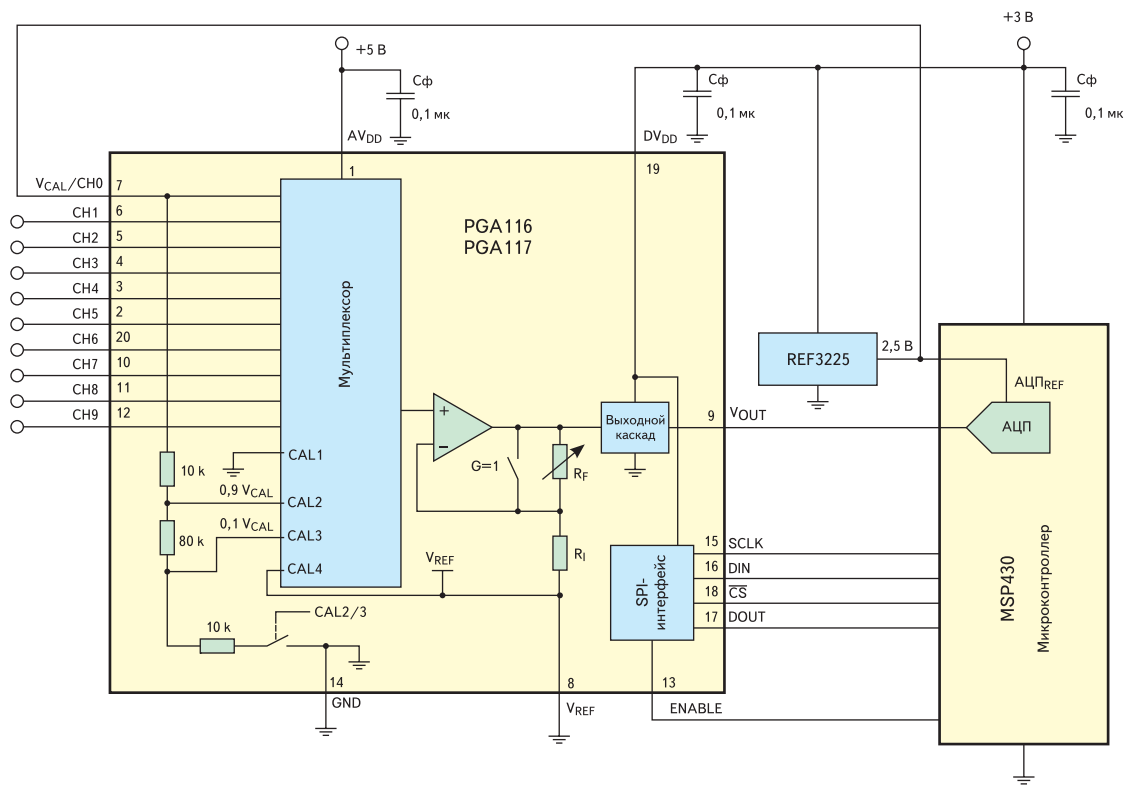


Рис. 2. Применение PGA116, PGA117 с калировкой каналов при  $V_{REF} = 0$

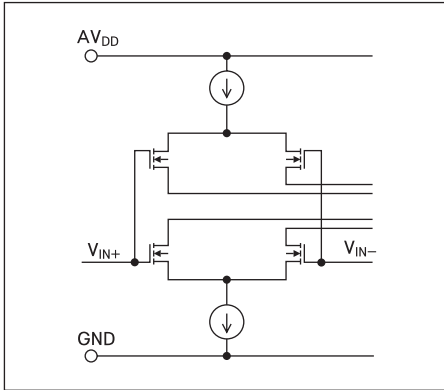


Рис. 3. Входной каскад PGA

нальные МОП-транзисторы для работы вблизи потенциала «земли» и параллельно подключенные *n*-канальные МОП-транзисторы для работы вблизи напряжения питания. Когда синфазное входное напряжение (точнее, напряжение на единственном входе, поскольку этот усилитель с программируемым усилением (PGA) внутренне сконфигурирован для неинвертирующего включения) пересекает уровень, типично лежащий на 1,5 В ниже напряжения питания, происходит переключение между *n*-канальными и *p*-канальными транзисторами. В результате этого переключения появляется небольшое изменение входного напряжения смещения, передающееся на выход с установленным усилением. Это изменение для тех или иных экземпляров приборов может быть разным: и положительным, и отрицательным. Поскольку граница переключения иная для разных образцов микросхем, входное напряжение смещения нормируется для

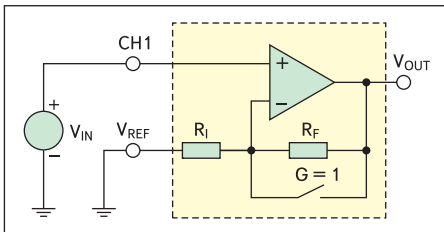


Рис. 4. Использование PGA в качестве усилительного блока

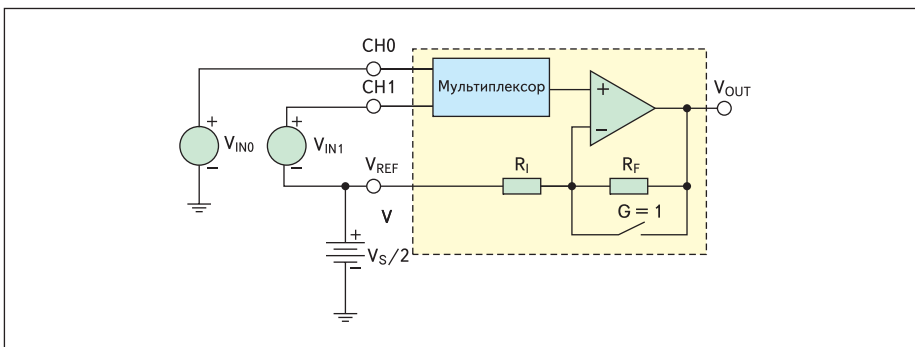


Рис. 5. Конфигурирование PGA для усиления сигнала относительно виртуальной «земли»

Таблица 2. Связь частотных характеристик с усилением ( $C_n = 100$  пФ,  $R_n = 10$  кОм)

Усиление	Полоса пропускания на уровне -3 дБ, МГц	Время спада, В/мкс	Время нарастания, В/мкс	Время установления с погрешностью 0,1% и амплитудой 4 В, мкс	Время установления с погрешностью 0,01% и амплитудой 4 В, мкс
1	10	8	3	2	2,55
2	3,8	9	6,4	2	2,6
4	2	12,8	10,6	2	2,6
5	1,8	12,8	10,6	2	2,6
8	1,8	12,8	10,6	2	2,6
10	1,8	12,8	10,6	2,2	2,6
16	1,6	12,8	12,8	2,3	2,6
20	1,3	12,8	9,1	2,3	2,8
32	1,8	12,8	13,3	2,3	3
50	0,9	9,1	7,1	2,4	3,8
64	0,6	4	3,5	3	6
100	0,38	4	3,5	4,4	7
128	0,35	2,5	2,5	4,8	9
200	0,23	2,3	2	6,9	10

входного напряжения выше и ниже границы переключения (таблица 1).

На рис. 4 показана базовая конфигурация использования PGA в качестве усилительного блока.

Выходное напряжение определяется выражением:

$$V_{OUT} = G \times V_{IN}, \quad (1)$$

где  $G = 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128$  (для PGA112, PGA116);  $G = 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200$  (для PGA113, PGA117).

На рис. 5 изображена конфигурация PGA с  $V_{REF} = AV_{DD}/2$ , а выражения (2, 3) определяют выходное напряжение для нее.  $V_{OUT0}$  — это выходное напряжение  $V_{OUT}$ , когда выбран канал CH0, а  $V_{OUT1}$  — это  $V_{OUT}$ , когда выбран канал CH1. Эта конфигурация обеспечивает положительное и отрицательное изменение напряжения относительно виртуальной «земли» — средней точки питания. Вывод  $V_{REF}$  не оказывает никакого воздействия при  $G = 1$ , потому что внутренний резистор обратной связи,  $R_F$ , замкнут накоротко.

$$V_{OUT0} = G \times V_{IN0} - AV_{DD}/2 \times (G-1). \quad (2)$$

Если  $G = 1$ , то  $V_{OUT0} = G \times V_{IN0}$ .

$$V_{OUT1} = G(V_{IN1} + AV_{DD}/2) - AV_{DD}/2 \times (G-1);$$

$$V_{OUT1} = G \times V_{IN1} + AV_{DD}/2, \quad \text{где } -AV_{DD}/2 < G \times V_{IN1} < +AV_{DD}/2 \quad (3)$$

и  $G = 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128$  (для PGA112, PGA116);  $G = 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200$  (для PGA113, PGA117).

Типовое значение сопротивления обратной связи  $R_1 = 3,25$  кОм. Соответствующее усилению значение сопротивления резистора обратной связи  $R_F$  можно рассчитать по выражению (4).

$$G = 1 + R_F/R_1. \quad (4)$$

Малосигнальная полоса пропускания и быстродействие усилителя (скорости нарастания и спада выходного сигнала) связаны с выбранным усилением. Частотные характеристики микросхем приведены в таблице 2. Полоса пропускания на полной мощности (то есть самая высокая частота, на которой синусоидальный сигнал может пройти через PGA без заметных искажений) связана с быстродействием уравнением (5):

$$SR [B/мкс] = 2pf \times V_{OP} (1 \times 10^{-6}), \quad (5)$$

где  $SR$  — скорость изменения сигнала, В/мкс;  $f$  — частота, Гц;  $V_{OP}$  — амплитуда выходного напряжения, В.

Входной аналоговый мультиплексор имеет два входных канала в PGA112 и PGA113 и 10 входных каналов в PGA116 и PGA117. Ключи мультиплексора сконструированы так, что они выключаются быстрее, чем включаются, и таким образом устраняют любые проблемы с замыканием двух источников входных сигналов между собой. Четыре внутренних калибровочных канала мультиплексора включены в состав аналогового мультиплексора для упрощения калибровки системы. Эти калибровочные каналы позволяют скорректировать погрешности усиления и смещения нуля АЦП. Калибровка не устраняет погрешностей смещения и усиления PGA при усилении, большем 1, но для большинства систем должно быть заметным существенное увеличение точности АЦП. Кроме того, эти калибровочные каналы могут использоваться АЦП, чтобы контролировать минимально и максимально возможные напряжения от PGA. В архитектуре системы



Рис. 6. Передаточная функция АЦП

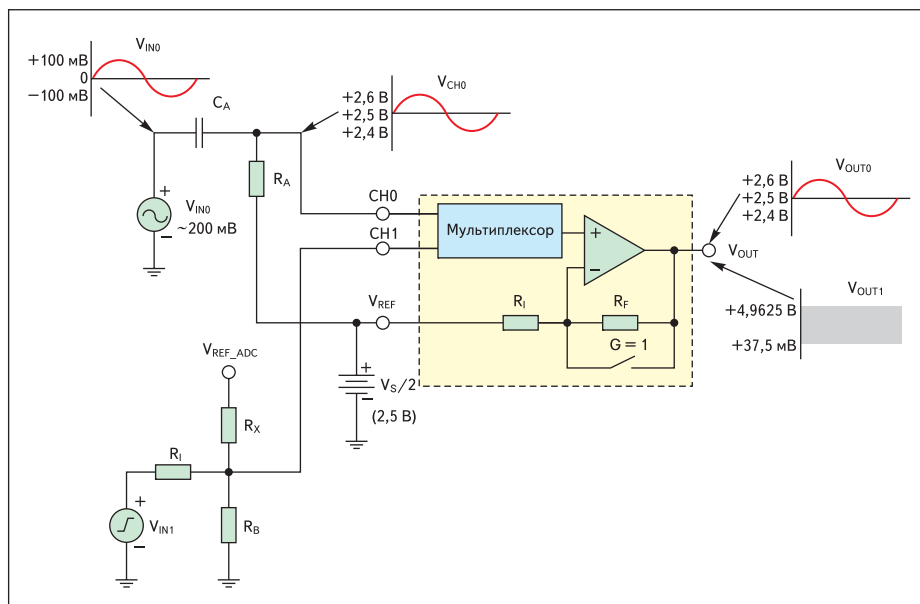


Рис. 7. Масштабирование входа PGA

может быть предусмотрена индикация выхода входных аналоговых сигналов за установленные пределы.

Для использования калибровочных каналов вывод  $V_{CAL}/CH0$  должен быть постоянно подключен к опорному напряжению системного АЦП. Вывод  $V_{REF}$  должен быть подключен к источнику с низким выходным сопротивлением по постоянному и переменному токам, чтобы обеспечить минимальные погрешности по усилению и нелинейности. Вывод  $V_{REF}$  представляет максимальную нагрузку при  $G = 1$ , когда резистор 3,25 кОм включен между  $V_{OUT}$  и  $V_{REF}$ . Для 5-В системы при  $AV_{DD}/2 = 2,5$  В источник, подключенный к выводу  $V_{REF}$ , должен отдавать минимум  $2,5 \text{ В}/3,25 \text{ кОм} = 0,7 \text{ мА}$  для  $V_{OUT}$ , изменяющегося от «земли» до +5 В.

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) имеют две погрешности, которые могут быть легко устранены калибровкой на уровне системы. Это погрешность усиления и погрешность смещения нуля. На рис. 6 показана типовая передаточная функция 12-разрядного АЦП. Аналоговое входное напряжение изменяется по оси X в диапазоне от нуля до  $(V_{REF\_ADC} - 1M3P)$ , где  $V_{REF\_ADC}$  — опорное напряжение для АЦП. Ось Y — шестнадцатеричный эквивалент цифровых кодов результатов аналого-цифрового преобразования. Пунктирная красная линия показывает идеальную передаточную функцию с представлением нулевого напряжения как 0000 и представлением  $(V_{REF\_ADC} - 1M3P)$  как 0FFFh. Сплошная синяя линия показывает погрешность смещения нуля. Хотя сплошная

синяя линия включает в себя и погрешность смещения нуля, и погрешность усиления, при напряжении на аналоговом входе, равном нулю, может быть измерено напряжение смещения нуля  $V_{Z\_ACTUAL}$ . Штриховая черная линия представляет функцию передачи с погрешностью усиления. Штриховая черная линия эквивалентна сплошной синей линии без погрешности смещения нуля и может быть определена при использовании  $V_{Z\_ACTUAL}$  и  $V_{Z\_IDEAL}$ . Разница между штриховой черной и пунктирной красной линиями — погрешность усиления. Погрешности усиления и смещения нуля могут быть рассчитаны по известным выходным сигналам при нулевом и полном входных сигналах. Эти расчетные погрешности используются для коррекции отсчетов АЦП с целью устранения погрешностей усиления и смещения нуля. На практике нулевое входное напряжение (0 В) или максимальное входное напряжение ( $V_{REF\_ADC} - 1M3P$ ) не всегда может быть измерено из-за наличия собственных погрешностей смещения нуля и усиления АЦП. Однако если выполнить измерения достаточно близко к максимальному и нулевому значениям входного сигнала, «нуль» и «диапазон» могут быть откалиброваны очень точно, в предположении идеальной линейной передаточной функции АЦП. Для калибровки «нуля» выбирается 10%  $V_{REF\_ADC}$ , а для калибровки «диапазона» — 90%  $V_{REF\_ADC}$ .

На рис. 7 показан пример гибкости масштабирования входа PGA.  $V_{IN0}$  — источник входного переменного сигнала с амплитудой 100 мВ, который подключен по переменному току к CH0. PGA112/PGA113 включена с напряжением питания  $V_S$ , равным +5 В, и  $V_{REF}$ , равным с  $V_S/2$  (+2,5 В).  $V_{CH0}$  — входное напряжение с амплитудой 100 мВ, смещенное по уровню и центрированное на  $V_S/2$  (+2,5 В). При конфигурировании PGA113 с усилением 20 для вывода CH0 амплитуда выходного напряжения  $V_{OUT}$  составит 2 В относительно  $V_S/2$  (+2,5 В). Для входа CH1 усиление  $G = 1$ ; через резистивный делитель и резистивную цепь можно задать  $\pm 5$  В или 0 В. Такая установка обеспечивает биполярность при масштабировании одиночного входа.  $V_{REF\_ADC}$  — это опорное напряжение для АЦП, подключенного к выводу PGA112, PGA113.

Во всех моделях используется стандартный последовательный периферийный интерфейс (SPI), поддерживающий режимы 0,0 и 1,1.

Структура порта ввода/вывода для PGA116, PGA117 показана на рис. 8.  $\overline{CS}$ , DIN и SCLK — это КМОП-входы с триггером Шмитта. DIN имеет источник тока 10 мкА на «землю», чтобы обеспечить связь в гирлянде из нескольких PGA116, PGA117. DOUT — логический КМОП-выход. Когда  $\overline{CS}$  в единичном состоянии, DOUT находится в высокоимпедансном состоянии. Когда  $\overline{CS}$  принимает низкий уровень, DOUT находится в состоянии проводимости.

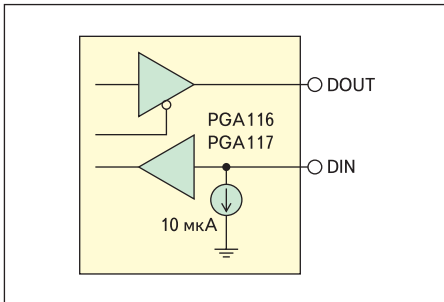


Рис. 8. Структура цифрового порта ввода/вывода PGA116, PGA117

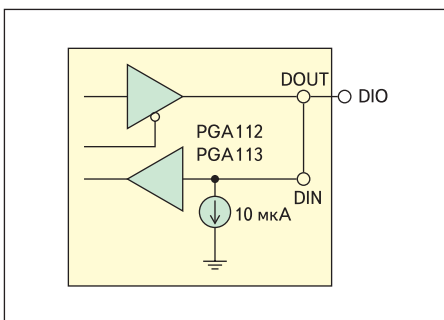


Рис. 9. Структура цифрового порта ввода/вывода PGA112, PGA113

Как показано на рис. 9, в PGA112, PGA113 цифровой выход и цифровой вход объединены на выводе DIO. DIN — это только вход, а DOUT — цифровой выход с тремя состояниями. DIO имеет источник тока 10 мкА на «землю», чтобы предотвратить состояние плавающего вывода в системах с высокоимпедансной SPI-линией DOUT. Когда  $\overline{CS}$  в единице, встроенный элемент DOUT в высокоимпедансном состоянии. Когда  $\overline{CS}$  в нуле, состояние DIO зависит от предшествующей действующей связи через SPI; либо DIO становится выходом, чтобы синхронизировать данные, или остается входом, чтобы получать данные.

PGA116 и PGA117 поддерживают включение гирлянды с полной способностью к чтению/записи. Это позволяет уменьшить число используемых выводов порта ввода/вывода микроконтроллера. Схема из

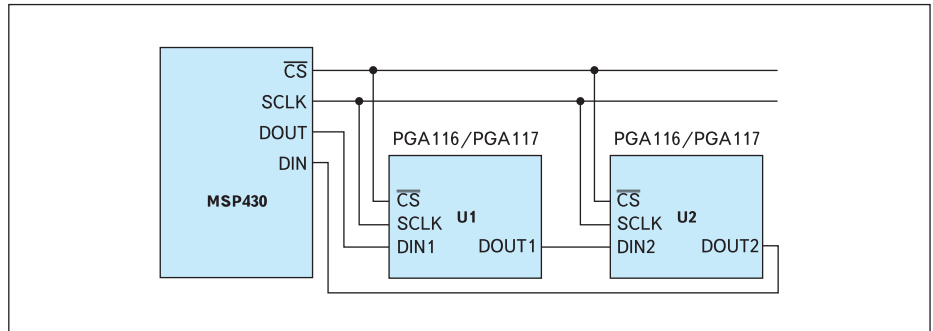


Рис. 10. Соединение микросхем гирляндой

двух последовательно включенных устройств показана на рис. 10, хотя в гирлянде может быть включено любое количество устройств. Используются общие линии SCLK и  $\overline{CS}$  в SPI для всех устройств в гирлянде. В режим связи данные перегоняются через каждое устройство в гирлянде с использованием соответствующих выводов DIN и DOUT. PGA112 и PGA113 могут быть использованы как последнее устройство в гирлянде, если приемлем режим только с записью, поскольку PGA112, PGA113 не имеют отдельного вывода DOUT, чтобы подключать к выводу микроконтроллера DIN для чтения данных в такой конфигурации.

Чтобы одновременно обеспечить широкополосность и большое усиление PGA112, PGA113 и PGA116, PGA117, следует соблюдать рекомендации по проектированию печатной платы и системы в целом.

Каждый вывод питания отдельно шунтируется на «землю» керамическим конденсатором, подключаемым непосредственно к выводам питания и «земли» микросхемы в том же слое печатной платы. Переходные отверстия можно использовать для подключения к слоям «земли» и питания. В такой конфигурации сохраняются паразитные индуктивные цепи, локально шунтирующие PGA. Хорошим решением в практике аналогового конструирования считается применение танталовых конденсаторов большого номинала для шунтирования каждого вывода питания.

Следует размещать  $V_{OUT}$  и проводники других цепей с низким выходным сопротивлением подальше от входных каналов мультиплексора с их высоким входным сопротивлением. Плохая разводка сигнальных цепей может вызвать положительную обратную связь, нежелательную генерацию или чрезмерные выбросы и колебания при ступенчатом изменении сигналов. Если входные сигналы сильно зашумлены, входные каналы мультиплексора следует разделить охранными проводниками с любой стороны сигнальных проводников. Охранные проводники соединяются с «землей» около PGA и в точке входа сигнала в печатную плату. В многослойных платах нужно обеспечить отсутствие проводников, параллельных входным цепям мультиплексора, в смежных слоях; емкостная связь с другими слоями может вызвать проблемы. Для изоляции входных сигнальных проводников от сигнальных проводников используются слои «земли» в других слоях.

Кроме того, цифровые сигналы PGA следует сгруппировать и развести по возможности подальше от аналоговых входных сигналов мультиплексора. Цифровые сигналы являются сигналами с малыми временами нарастания и спада при низком выходном сопротивлении их источников и легко воздействуют на высокоомные входы входных каналов мультиплексора. Эта связь может создать нежелательный шум на выходном сигнале.

Входные каналы мультиплексора являются высокоомными, в комбинации с большим усилением может появиться нежелательный шум. Рекомендуется использовать низкоомные источники сигналов (<10 кОм), а также шунтировать входные каналы мультиплексора керамическими конденсаторами емкостью более 100 пФ непосредственно на входах мультиплексора. Низкое сопротивление источника и шунтирующий конденсатор, установленный непосредственно на входе канала мультиплексора, минимизируют взаимопроникновение между каналами, вызванное паразитной емкостной связью между смежными проводниками печатной платы и межвыводными емкостями.

На странице сайта Texas Instruments в Интернет <http://focus.ti.com/general/docs/newproducts.tsp?&contentType=3&releasePeriod=29> перечислены все новинки фирмы. Среди последних новинок:

- TDA2036D1 — монофонический усилитель D-класса с выходной мощностью 2,5 Вт на нагрузке 8 Ом, выполненный в виде кристалла с шариковыми выводами. Коэффициент полезного действия на мощности 0,4 Вт достигает 88%.
- TRA6047A4 — стереофонический усилитель для головных телефонов с напряжением питания 5 В и выходной мощностью 2 Вт на нагрузке 4 Ом. Коэффициент нелинейных искажений не превышает 0,1% при выходной мощности 1 Вт. Конструктивно выполнен в 32-выводном корпусе QFN.
- PCM1690 и PCM1691 — 24-разрядные 8-канальные аудио-ЦАП с частотой выборки до 192 кГц с дифференциальными и одиночными выходами соответственно, предназначенные для применения в высококачественной звуковоспроизводящей аппаратуре.
- PCM1789 — 24-разрядный стерео/аудио ЦАП с частотой выборки до 192 кГц с дифференциальными выходами, с несколькими аудио- и цифровыми управляющими интерфейсами.
- TLV320AIC3204 и TLV320AIC3254 — микроомощные низковольтные стерео/аудиокодеки с программируемыми входами и выходами.