

# 16-РАЗРЯДНЫЕ, 16-КАНАЛЬНЫЕ АЦП ПОРАЗРЯДНОГО УРАВНОВЕШИВАНИЯ С КОММУТАЦИЕЙ КАНАЛОВ

## 16-BIT, 16-CHANNEL SAR ADCS WITH MULTIPLEXED CHANNEL

В статье приведена информация о 16-разрядном, 16-канальном АЦП, предназначенном для использования в многоканальных системах контроля и сбора данных. Особенностью АЦП является возможность работы в режиме передискретизации и децимации с различными коэффициентами. В режиме передискретизации результаты преобразования усредняются в процессе децимации полученных данных, что позволяет увеличить число эффективных разрядов до 19.

В. Макаренко

**Abstract** – The article provides information about a 16-bit, 16-channel ADC intended for use in multichannel control and data acquisition systems. A special feature of the ADC is the ability to work in oversampling and decimation modes with different coefficients. In the oversampling mode, the conversion results are averaged during the decimation of the received data, which makes it possible to increase the number of effective bits to 19.

V. Makarenko

Новые 16-разрядные, 16-канальные АЦП поразрядного уравнивания компании Analog Devices AD4695/AD4696 с частотой дискретизации 500 кГц/1 МГц предназначены для использования в многоканальных системах мониторинга и сбора данных [1]. Низкий уровень перекрестных помех, малая потребляемая мощность и габариты позволяют создавать на их базе малогабаритные прецизионные измерительные системы.

Основные параметры АЦП:

- защита входов от перенапряжения и ограничение входного тока величиной 5 мА
- длительность фазы получения данных  $\geq 71.5\%$  тактового интервала (715 нс/1000 нс)
- частота дискретизации 500 кГц (AD4695) или 1 МГц (AD4696)
- интегральная нелинейность не более  $\pm 1$  ЕМР
- гарантированные 16 разрядов без пропусков кода
- отношение сигнал/шум 93 дБ (типичное значение при  $V_{ref} = 5$  В и частоте входного сигнала 1 кГц)
- расширенный динамический диапазон при работе в режиме передискретизации – 111.2 дБ, при коэффициенте передискретизации 64
- настраиваемые коэффициенты передискретизации и децимации
- автоматическая коррекция коэффициента усиления и напряжения смещения
- точное первое преобразование без задержки
- возможность работы в режиме автономного преобразования (автоцикл)
- поддержка последовательных интерфейсов SPI-/QPSI-/MICROWIRE-/DSP- совместимых

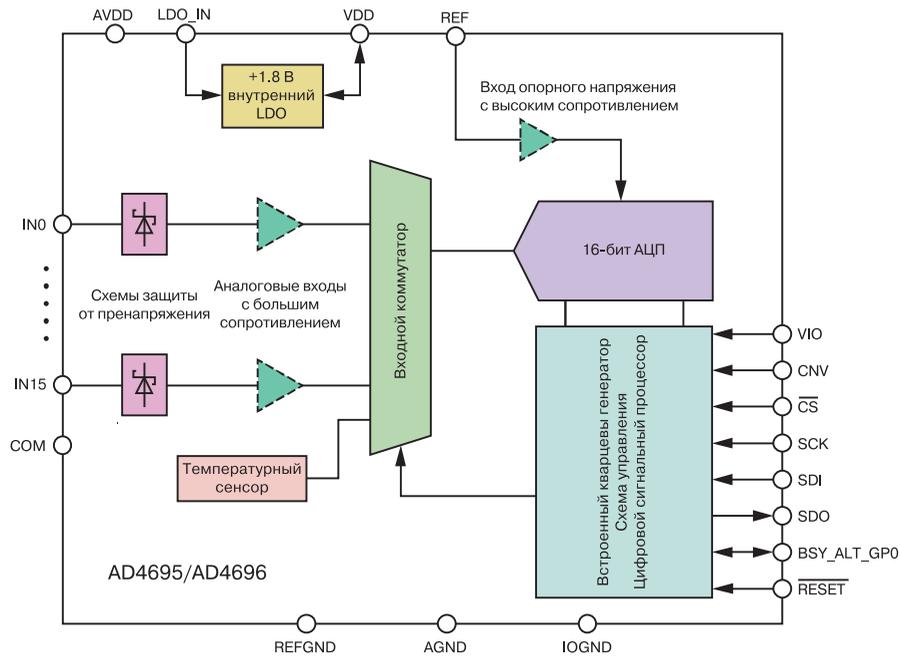
- напряжение питания аналоговой части 3.15... 5.5 В
- напряжение питания цифровой части 1.71... 1.79 В
- напряжение на входе LDO 2.4...5.5 В
- малая мощность потребления – 8 мВт при частоте дискретизации 1 МГц, 4 мВт при частоте дискретизации 500 кГц
- потребляемая мощность 4 мкВт в спящем режиме при отключенном внутреннем LDO-стабилизаторе
- уровень логической "1" от 1.14 до 1.98 В
- диапазон рабочих температур от -40 до 125 °С
- корпус LFCSP-32
- габаритные размеры 5×5 мм.

Функциональная схема АЦП приведена на рис. 1.

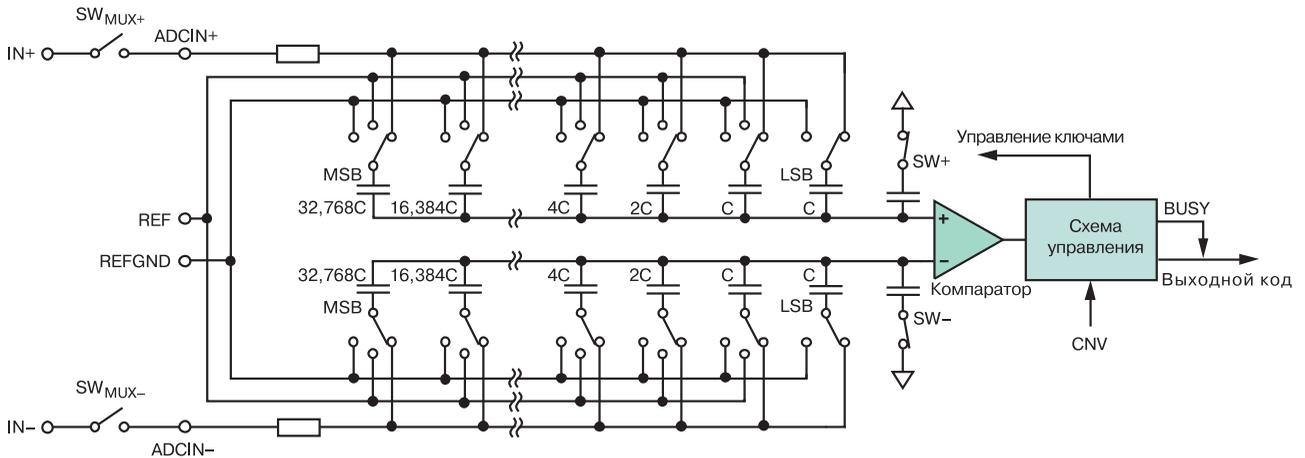
В АЦП предусмотрено программирование последовательности подключения каналов к входу АЦП. Управлять порядком переключения входов можно и по интерфейсу SPI.

АЦП содержит ядро на основе регистра последовательных приближения, цифро-аналоговый преобразователь с перераспределением зарядов для квантования отсчетов сигнала по уровню (рис. 2).

Цикл работы АЦП состоит из двух тактов – такта получения и такта преобразования. В течение такта получения массив конденсаторов заряжается напряжением, поданным на один из 16 входов, выбранный с помощью аналогового коммутатора. Массив конденсаторов, связанный с входом компаратора, подключается к выходу источника опорного напряжения REF или к общему проводу REFGND через переключатели SW+ и SW-.



**Рис. 1. Функциональная схема АЦП AD4695/AD4696**



**Рис. 2. Структура ядра АЦП, использующего ЦАП с перераспределением зарядов**

Такт преобразования начинается после подачи на вход CNV фронта импульса запуска преобразования. Когда начинается процесс преобразования, переключатели SW+, SW-, SWMUX + и SWMUX замыкаются и на конденсаторах остается накопленный на первом такте заряд. Два конденсатора массива подключаются к REFGND. Напряжение с выбранной пары конденсаторов подается на входы компаратора, что приводит к его срабатыванию.

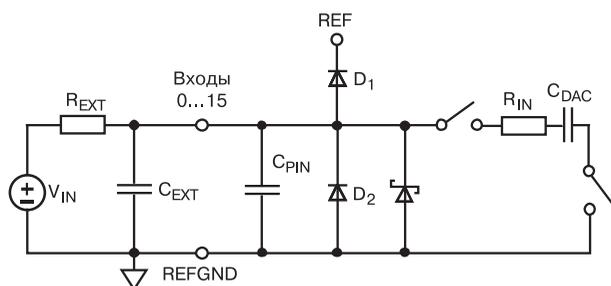
Схема управления проводит тестирование для каждого конденсатора в массиве, начиная со старшего разряда (MSB), переключая каждый конденсатор массива между REFGND и REF. Во время каждого испытания напряжение на входе компаратора

варьируется в диапазоне от значения  $V_{ref}/2$  до  $V_{ref}/65536$ ). Состояние компаратора записывается для каждого случая сравнения до получения окончательного результата.

На рис. 3 приведена эквивалентная схема входной цепи АЦП.

Импеданс аналоговых входов определяется емкостью выводов  $C_{PIN}$  и цепочки  $R_{IN}$ ,  $C_{DAC}$ . Сопротивление  $R_{IN}$  примерно равно 240 Ом, а емкость  $C_{DAC}$  (эквивалентная входная емкость ЦАП, показанного на рис. 2) обычно составляет 60 пФ.

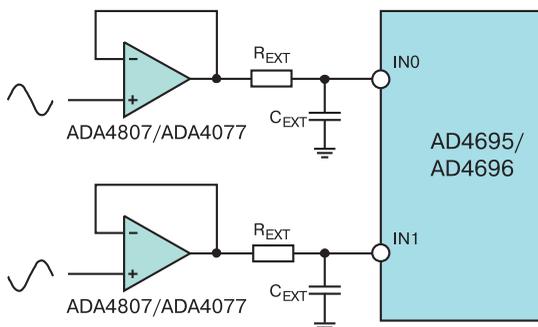
Каждый аналоговый вход содержит элементы защиты от перенапряжения, что позволяет отказаться от использования внешних элементов защи-



**Рис. 3. Эквивалентная схема входной цепи АЦП**

ты. Для ограничения полосы частот сигнала на входе АЦП включен пассивный фильтр нижних частот, состоящий из внешних компонентов  $R_{EXT}$  и  $C_{EXT}$ .

Для повышения входного сопротивления АЦП без ухудшения его шумовых характеристик рекомендуется на входе включить малошумящий прецизионный операционный усилитель, как показано на рис. 4.



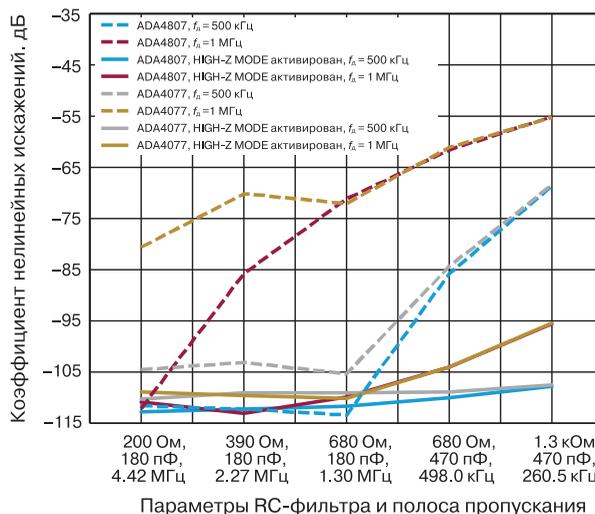
**Рис. 4. Рекомендуемая схема включения входных цепей АЦП**

Усилитель выбирается в зависимости от требуемой полосы пропускания. Параметры рекомендованных в [1] усилителей приведены в табл. 1. Конечно, при необходимости можно найти массу других прецизионных ОУ с низким уровнем шума на сайте Analog Devices.

**Таблица 1. Параметры рекомендованных операционных усилителей**

| Тип     | Спектральная плотность шума | Полоса пропускания | Ток потребления |
|---------|-----------------------------|--------------------|-----------------|
| ADA4807 | 3.1 нВ/√Гц                  | 180 МГц            | 1.0 мА          |
| ADA4077 | 6.9 нВ/√Гц                  | 5.9 МГц            | 400 мкА         |

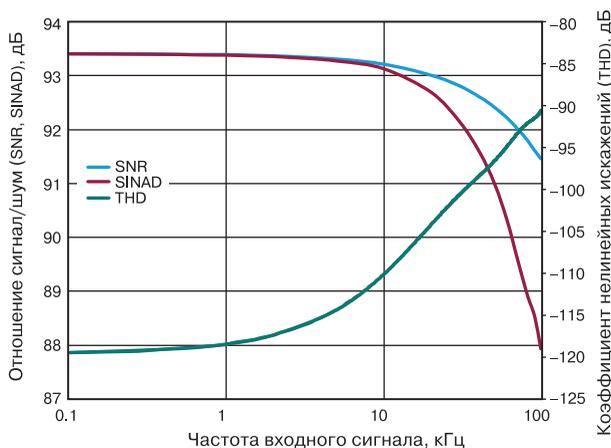
Эффективность использования усилителей иллюстрирует рис. 5. При отключенном режиме высокого входного сопротивления и использовании внешних усилителей коэффициент нелинейных ис-



**Рис. 5. Зависимости коэффициента нелинейных искажений от полосы пропускания ФНЧ и режима работы АЦП**

кажений, а, следовательно, и динамический диапазон АЦП, значительно шире, чем при использовании режима высокого входного сопротивления. При этом входное сопротивление определяется только входным током ОУ.

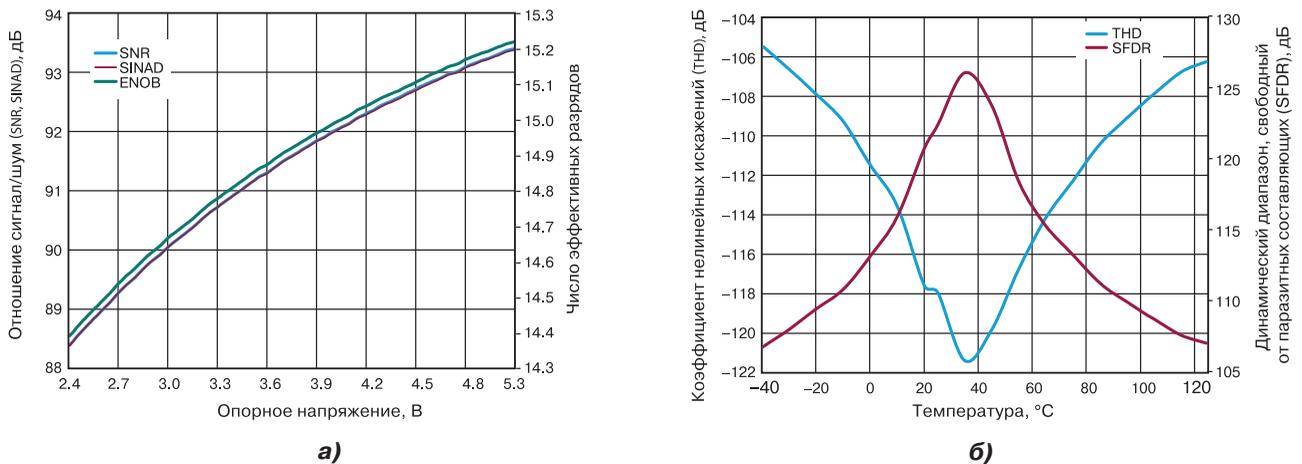
На рис. 6 приведены зависимости отношения сигнал/шум и коэффициента нелинейных искажений от частоты входного сигнала.



**Рис. 6. Зависимости отношения сигнал/шум и коэффициента нелинейных искажений от частоты входного сигнала**

При использовании этих АЦП следует помнить, что число эффективных разрядов и отношение сигнал/шум зависят от величины опорного напряжения, как показано на рис. 7, а для частоты входного сигнала 1 кГц.

Зависимость нелинейных искажений от температуры тесно связана с величиной динамического диапазона, свободного от паразитных составляющих.



**Рис. 7. Зависимости отношения сигнал/шум и числа эффективных разрядов преобразования от величины опорного напряжения (а) и коэффициента нелинейных искажений и SFDR от температуры (б)**

щих. Из рис. 7,б следует, что чем больше динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих, тем меньше значение коэффициента нелинейных искажений.

AD4695/AD4696 содержит датчик температуры, преобразующий температуру кристалла в напряжение, которое может быть преобразовано в код ядром АЦП. Подключение датчика к входу АЦП осуществляется аналоговым коммутатором.

Выходное напряжение датчика определяется по формуле

$$V_{TEMP} = (-1.8 \text{ мВ}/^{\circ}\text{C})T + 725 \text{ мВ}.$$

Чувствительность датчика температуры составляет  $-1,8 \text{ мВ}/^{\circ}\text{C}$ . При  $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  выходное напряжение датчика равно  $725 \text{ мВ}$ .

Опорное напряжение VREF определяет размах напряжения полной шкалы АЦП. Диапазон допустимых значений опорного напряжения для AD4695/AD4696 от  $2.4$  до  $5.1 \text{ В}$ . Значение опорного напряжения, заданное в регистре REF\_CTRL, должно совпадать со значением напряжения, подведенного к выводу REF.

Поскольку от стабильности опорного напряжения зависит точность преобразования, а во время преобразования ток, потребляемый от источника VREF, изменяется в достаточно широких пределах, то к такому источнику предъявляются повышенные требования. Он либо при максимальном токе должен обеспечить заданную точность, либо необходимо возле вывода REF установить конденсатор большой емкости.

В AD4695/AD4696 предусмотрен режим работы

high-Z для входа опорного напряжения. В этом режиме значение тока, потребляемого от опорного источника, снижается примерно на  $95\%$ , от  $320 \text{ мкА}/\text{МГц}$  до  $11 \text{ мкА}/\text{МГц}$ , без снижения точности и производительности АЦП. Это позволяет снизить требования к источнику опорного напряжения.

#### Передискретизация и децимация

В АЦП AD4695/AD4696 предусмотрена возможность работы с передискретизацией входного сигнала и децимацией выходного сигнала. При децимации усредняются последовательные выборки АЦП, сформированные в процессе преобразования с передискретизацией (повышенной в несколько раз частотой дискретизации). Это позволяет увеличить эффективное число разрядов и увеличить отношение сигнал/шум.

Для каждого аналогового входного канала можно настроить коэффициент передискретизации OSR, равный  $1, 4, 16$  или  $64$ . Результаты преобразования с OSR  $4, 16$  или  $64$  имеют эффективную разрядность  $17, 18$  или  $19$  бит.

#### Цифровые интерфейсы и входы управления

В AD4695/AD4696 встроен 4-проводный интерфейс SPI, вход запуска преобразования (CNV), вход сброса RESET и вывод BSY\_ALT\_GPO, который функционирует как выход общего назначения.

Цифровой интерфейс SPI AD4695/AD4696 имеет два рабочих режима – режим конфигурации регистра и режим преобразования. В режиме конфигурации регистров SPI используется для чтения и записи в регистры конфигурации. В режиме преобразования SPI используется для чтения результатов преобразования и дополнительных битов состояния. Логический уровень интерфейса установ-

ливается напряжением VIO и может варьироваться от 1.2 до 1.8 В.

Подробное описание состояния регистров и порядка работы в режимах преобразования и считывания приведены в [1]. Типовая схема включения АЦП приведена на рис. 8.

Для отладки приложений с использованием AD4695/AD4696 компания Analog Devices предлагает отладочную плату EVAL-AD4696FMCZ [2], приведенную на рис. 9.

EVAL-AD4696FMCZ разработана, чтобы предоставить доступ ко многим параметрам конфигурации через простой в использовании графический интерфейс программного обеспечения ACE.

Аппаратное обеспечение включает два аналоговых входных канала с внешним управлением для оценки характеристик на переменном токе и 14 каналов для анализа на постоянном токе. Испытательные напряжения формируются на отладочной плате. Каналы с внешним управлением подключаются к прецизионным генераторам сигналов через ВЧ-разъемы. ПО AD4696 ACE обменивается данными с EVAL-AD4696FMCZ через плату контроллера EVAL-SDP-CH1Z. Программное обеспечение также позволяет выполнять аналого-цифровое преобразование и предоставляет инструменты анализа сигналов во временной и частотной области для быстрой оцен-



Рис. 9. Отладочная плата EVAL-AD4696FMCZ

ки параметров AD4696.

Подробное описание работы с отладочной платой, схема подключения оборудования и порядок работы с ПО приведены в [2].

### ЛИТЕРАТУРА

1. [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad4695\\_4696.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad4695_4696.pdf)
2. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/eval-ad4696fmcz-ug-1882.pdf>

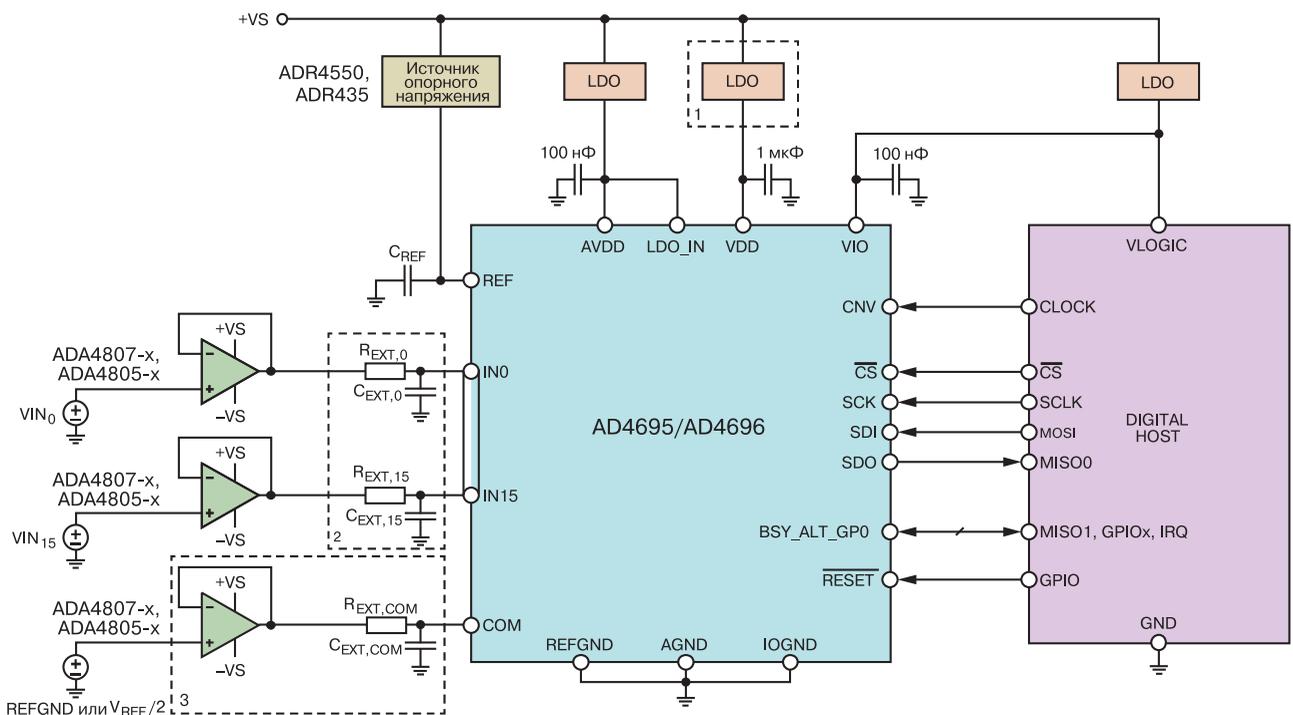


Рис. 8. Типовая схема включения АЦП AD4695/AD4696