

*Д. Г. Артёмов, В. Е. Пониматкин*

## СЕМЬ ЭТАПОВ ПОДКЛЮЧЕНИЯ АЦП ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ С МИНИМИЗАЦИЕЙ ШУМА ЭЛЕМЕНТОВ

*Для высокочастотных преобразований необходимо правильно спроектировать блок усиления перед аналого-цифровым преобразователем. Чтобы достичь оптимального отношения сигнал / шум, требуется правильно подобрать АЦП, а также настроить схему на принимаемый сигнал. В данной статье рассмотрены несколько этапов для успешного преобразования аналогового сигнала высокого разрешения.*

103

*High-frequency transformations require to correctly design the gain unit before the analog-to-digital converter. To achieve the optimum signal-to-noise ratio, you need to select the correct ADC, and also configure the circuit to receive the signal. The authors focus on several stages for successful conversion of an analog high-resolution signal.*

**Ключевые слова:** высокочастотные преобразования, АЦП, минимизация уровня шума.

**Keywords:** high-frequency conversion, ADC, noise level minimization.

Колебания, окружающие нас (вибрация, температура, давление и свет) при цифровой обработке, мешают точно сформировать и преобразовать сигнал. Чтобы исключить ряд проблем, связанных с высокоточным преобразованием, разработчики придумали низкошумящий аналоговый входной блок аналого-цифрового преобразователя (АЦП), который повышает ключевой параметр — сигнал / шум. Однако множество проектов не могут себе позволить не только дорогие детали, но и высокую потребляемую мощность малошумящих элементов.

Данная статья рассматривает проблему создания оптимального подхода, который позволит эффективно подключить блок усиления перед аналого-цифровым преобразователем, а также содержит пример, с помощью которого можно продемонстрировать этот принцип. Расчет и анализ шума выполняются в схеме с низкочастотным сигналом.

При проектировании входного аналогового блока АЦП выделяются следующие этапы.

1. Снять показания с выхода датчика или части электрической схемы перед блоком усиления.
2. Вычислить характеристики АЦП.
3. Подобрать подходящий АЦП и источник опорного напряжения к нему.
4. Найти максимальный коэффициент усиления (КУ) и определить подходящие характеристики для операционного усилителя (ОУ).



5. Подобрать оптимальный усилитель и спроектировать блок усиления (БУ).
6. Проверить общий уровень шума в разрабатываемой схеме.
7. Запустить симуляцию схемы и проверить ее работоспособность.

**Этап 1. Снять показания с выхода датчика или части электрической схемы перед блоком усиления.** Сигнал поступает на блок усиления с датчика или при проходе через помехозащитный фильтр (EMI и RFI). При проектировке БУ необходимо знать параметры входного сигнала, а также переменный ток источников питания. Измерив шум и остальные показатели сигнала, можно вычислить, какой диапазон уровня шума и входного напряжения нам понадобится при выборе АЦП.

Предположим, что мы имеем следующие параметры: 10 кГц с полной амплитудой 250 мВ (88,2 мВ – среднее квадратическое значение), уровень шума 25 мкВ и блок питания 5 В. Используя эти данные, мы можем рассчитать отношение сигнал / шум на входе АЦП для второго этапа. Чтобы упростить обработку данных и уменьшить погрешность вычислений, допустим, что разрабатываемая схема предназначена для эксплуатации при комнатной температуре.

**Этап 2. Вычислить характеристики АЦП.** Какие характеристики АЦП нам требуются? Тип аналого-цифрового преобразователя, количество бит и частота дискретизации. Используя известную входную амплитуду и шум из первого этапа, мы можем рассчитать показатель SNR (сигнал / шум) на выходе блока усиления, после чего подобрать АЦП с подходящими параметрами. Зная, в свою очередь, SNR, можно рассчитать эффективное количество бит (ENOB), эти вычисления указаны в уравнениях (1) – (3). Показатели ENOB и SNR можно найти в любом заводском описании АЦП (data sheet). В нашем случае величина SNR порядка 86,8 дБ, эффективное количество бит – 14,2, что толкает к выбору 16-разрядного АЦП. Кроме того, по закону Найквиста – Котельникова принимаемая частота должна быть как минимум в два раза меньше частоты дискретизации, и следовательно, достаточно использовать АЦП, преобразующий со скоростью 20 кГц/с.

После этого нам потребуется разработать такую схему, в которой плотность шума будет составлять  $416 \text{ нВ} / \sqrt{\text{Гц}}$ , поскольку шум схемы формирования сигнала тогда будет составлять  $1/10$  от входного шума.

$$SNR = 20 \log\left(\frac{250 \text{ мВ}}{25 \text{ мкВ} / 6}\right) = 86,8 \text{ дБ} \quad (1)$$

$$ENOB = \frac{86,8 - 1,76}{6,02} = 14,2 \text{ бит} \quad (2)$$

$$U_{ш} = \frac{25 \text{ мкВ}}{6} = 4,16 \text{ мкВ} \quad (3)$$



**Этап 3. Подобрать подходящий АЦП и источник опорного напряжения к нему.** Измерив и вычислив требуемые показатели, можно подобрать подходящий аналого-цифровой преобразователь. Легче всего искать соответствующий 16-битный АЦП на сайте производителя, где можно вводить любые характеристики и выбирать из нескольких вариантов.

Многие 16-битные АЦП имеют характеристику ENOB, равную 14,5. Используя передискретизацию и повысив разрядность АЦП до 16, можно перераспределить шум квантования на более широкий спектр частот (n-битная передискретизация получается при  $4^n$ ). Также передискретизация применяется в низкоразрешающих АЦП: 12-битный АЦП с передискретизацией 256 ( $4^4$ ) сможет обеспечить 16-битную характеристику спектра шума квантования. Для нашего примера можно подобрать 12-битный АЦП с частотой дискретизации, равной 5,126 МГц (20 Квыборок/с  $\times$  256). 14-битный АЦП с передискретизацией  $4^4$  (1,28 Мвыборок/с) будет более подходящим вариантом. Однако стоят такие АЦП так же, как и AD 7685 16 бит (250 Квыборок/с).

16-битный АЦП модели AD7685 производства PulSAR (самый подходящий из предложенных) имеет характеристики SNR = 90 дБ и 250 Квыборок/с, что соответствует нашим требованиям. Производитель рекомендует использовать источники опорного напряжения ADR421/ADR431 производства XFET. Входное напряжения источника равно 2,5 В в диапазоне 250 мВ.

$$U_{\text{вх.действит}} = \frac{2,5\text{В}}{2\sqrt{2}} = 884 \text{ мВ} \quad (4)$$

$$U_{\text{ш.действит}} = \frac{884 \text{ мВ}}{\frac{90}{10^{20}}} = 27,95 \text{ мкВ} \quad (5)$$

$$U_{\text{ш.дополнит}} = \frac{U_{\text{ср.квдр}}}{\sqrt{\frac{1}{2} f_{\text{дискрет}}}} = \frac{27,95 \text{ мкВ}}{\sqrt{125 \text{ кГц}}} = 79 \text{ нВ} / \sqrt{\text{Гц}} \quad (6)$$

Параметры AD7685 включают в себя импеданс на входе АЦП. Чтобы отличать его от паразитной индуктивности, нужно подключить разделяющий конденсатор близко к контактам, соединяющим дорожки на плате. Кремневый конденсатор в 22 мкФ позволит обеспечить максимальную производительность.

**Этап 4. Найти максимальный коэффициент усиления и определить подходящие характеристики для операционного усилителя.** Зная диапазон преобразуемых частот АЦП, можно высчитать все требуемые параметры для блока усиления. Чтобы увеличить динамический диапазон частот, следует повысить коэффициент усиления и частоту входного сигнала АЦП. Это поможет сконструировать БУ с КУ порядка 10.

$$U_{\text{вх}} = 250 \text{ мВ} \quad (7)$$



$$U_{\text{диапазон}} = 2,5 \text{ В} \quad (8)$$

$$КУ = 10 \quad (9)$$

$$f = 1 \text{ ГГц} - 10 \text{ кГц} \quad (10)$$

Заметим, что для AD7685 без проблем можно усилить любой сигнал, однако ОУ должен удовлетворять всем требованиям. К примеру шум, создаваемый ОУ, нужно удерживать на минимальном уровне, чтобы сохранить SNR и передать сигнал на АЦП, однако стоит помнить, что при усилении сигнала усиливается и шум. Коэффициент нелинейного искажения усилителя должен быть соизмерим с AD7685 и быть настроен на массив конденсаторов, которые формируют шаг АЦП. Стоит брать в расчет, что шум, поступающий от усилителя, может быть частично погашен внешним фильтром.

106

Какой уровень шума требуется на входе операционного усилителя? Напомним, что плотность шума в нашей схеме не должна превышать  $416 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ . Поэтому нам придется спроектировать БУ с более низким уровнем шума (порядка 10 раз) из-за  $КУ = 10$ . Следовательно, это обеспечит существенную разность между уровнями шума усилителя и датчика. Чтобы рассчитать запас шума, предположим, что шум на входе операционного усилителя является суммарным шумом операционного усилителя и АЦП.

$$U_{\text{вх}} = 416 \text{ нВ}/10 = 41,6 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}} \quad (11)$$

$$U_{\text{ш. АЦП}} = 79 \text{ нВ}/10 = 7,9 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}} \quad (12)$$

$$U_{\text{ш.общ}} = \sqrt{(41,6 \text{ нВ})^2 - (7,9 \text{ нВ})^2} = 40,8 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}} \quad (13)$$

**Этап 5. Подобрать оптимальный усилитель и спроектировать блок усиления.** Чтобы подобрать операционный усилитель, для начала надо знать полосу пропускания входного сигнала. Нам понадобится ОУ с подходящей пропускной способностью и обработкой сигнала с минимальным количеством ошибок постоянного и переменного тока. Итак, требующиеся характеристики ОУ: полоса пропускания сигнала, коэффициент усиления шума и ошибка усиления. Далее выбираем усилитель с полосой усиления более 100 раз по сравнению с входным сигналом, чтобы сохранить погрешность усиления ниже 0,1%. Кроме того, нам нужен усилитель, который прост в установке и имеет хорошую работоспособность. Наш запас шума предполагает, что общий шум на входе операционного усилителя составлял менее  $40,8 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ , а АЦП –  $7,9 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ . Критериями поиска операционного усилителя являются: сверхвысокие частоты порядка 1 МГц, источник питания 5 В, хорошие показатели шумов напряжения и шумов тока, спецификации ТНД, низкие ошибки постоянного тока, не ухудшающие характеристики АЦП.



$$R_{ш} = 1 + \frac{R2}{R1} \quad (14)$$

$$f_{ш} = 1,57 f \quad (15)$$

Низкомощные прецизионные JFET-усилители AD8641 имеют чрезвычайно низкий входной ток смещения и такой же выходной ток с рабочим диапазоном от 5 до 26 В. Соответствующие спецификации приведены в таблице. Мы можем проанализировать операционный усилитель в неинвертирующей конфигурации со значениями компонентов, указанными в таблице.

Элементы блока усиления JFET

107

Элемент	Значение
R1	1,47 кОм
R2	13,3 кОм
R3	1,47 кОм
$E_n$	28,5 нВ/ $\sqrt{\Gammaц}$
$I_n$	50 фА/ $\sqrt{\Gammaц}$
Cf	0,47 нФ

Все активные и пассивные компоненты генерируют собственный шум, поэтому важно подобрать компоненты, не ухудшающие производительность. Нет смысла покупать малошумящий операционный усилитель и подключать к нему резисторы с высоким номиналом. Напомним, что резистор 1 кОм имеет шум 4 нВ.

В начале статьи упоминалось, что между АЦП и блоком усиления может использоваться дополнительный RC-фильтр, который должен помочь в сужении пропускной способности и улучшении отношения сигнал / шум.

**Этап 6. Проверить общий уровень шума в разрабатываемой схеме.** Крайне важно иметь представление обо всех источниках шумов в проектируемой схеме. Для достижения наилучшего SNR нам потребуется воспользоваться общим уравнением шума.

$$R_{ш} = \sqrt{\frac{n}{n}} \sqrt{Vn^2 + 4KTR1\left(\frac{R2}{R2+R1}\right)^2 + In^2 R3^2 + In^2 \left(\frac{R1 \times R2}{R1+R2}\right)^2 + 4KTR2\left(\frac{R1}{R1+R2}\right)^2} \quad (16)$$

Рассчитаем общий шум на входе операционного усилителя и убедимся, что он меньше, чем было запланировано, – 41,6 нВ/ $\sqrt{Гц}$ .

$$U_{ш.вх.ОУ} = 29,3 \text{ нВ} / \sqrt{\Gammaц} \quad (17)$$

$$U_{ш.вх.АЦП} = 7,9 \text{ нВ} / \sqrt{\Gammaц} \quad (18)$$

$$U_{ш.вх.общ} = \sqrt{(29,3 \text{ нВ})^2 + (7,9 \text{ нВ})^2} = 30,5 \text{ нВ} / \sqrt{\Gammaц} \quad (19)$$



Для того чтобы интегрировать общий шум по всей полосе пропускания, стоит учесть, что общий шум на входе АЦП по полосе пропускания фильтра составляет 3,05 мкВ, а это меньше требования к нашей конструкции в размере 4,16 мкВ. Мы игнорируем низкочастотный шум ( $1/f$ ), поскольку угловая частота AD8641 ниже 100 Гц.

$$U_{ш.ОУ > 10\text{кГц}} = 2,93 \text{ мВ} \quad (20)$$

$$U_{ш.АЦП > 10\text{кГц}} = 780 \text{ нВ} \quad (21)$$

$$U_{ш.вх.общ > 10\text{кГц}} = \sqrt{(2,93 \text{ мВ})^2 + (780 \text{ нВ})^2} = 3,04 \text{ мВ} / \sqrt{\Gamma_{ц}} \quad (22)$$

$$U_{общ > 10\text{кГц}} = 30,4 \text{ мкВ} \quad (23)$$

Для поддержания хорошего отношения сигнал / шум необходимо обратить внимание на шум каждого элемента в схеме, а также правильно скомпоновать элементы на печатной плате. CNV или часы, никогда не должны запускаться вблизи аналоговых дорожек сигнала. В целом избегайте переходные области между цифровыми и аналоговыми сигналами.

**Этап 7. Запустить симуляцию схемы и проверить ее работоспособность.** Для проверки схемы можно скачать макросы PSpice с сайта ADI. Быстрая симуляция скомпилирует полосу пропускания сигнала нашего устройства. После проверки на компьютере советуем собрать прототип схемы, чтобы подтвердить результаты до введения в эксплуатацию.

## Заключение

Некоторые схемотехнические проекты не могут позволить дорогостоящие компоненты и повышенное энергопотребление малошумящих элементов. Поэтому перед разработчиками стоит задача достичь минимального уровня шума и наилучшей производительности АЦП. Но для этого проектировщику необходимо понимать источник шума на уровне компонентов. Для поддержания хорошего отношения сигнал / шум требуется обратить внимание на шум каждого элемента в сигнальном тракте. В данной статье приведены несколько этапов, с помощью которых можно успешно преобразовать аналоговый сигнал с очень высоким разрешением.

## Список литературы

1. Катанович А.А. Комплексы и системы связи надводных кораблей. СПб., 2006.
2. Радиосвязь на внутренних водных путях Российской Федерации : сб. нормативных документов. М., 2009.
3. Справочник Международного Союза Электросвязи (ITU). Т. 4 : Список береговых станций и специальных сервисных станций. Женева, 2017.
4. Руководство по радиосвязи для использования в морской подвижной и морской подвижной спутниковой службах на английском языке. Женева, 2016.



5. Радиостанция : пат. 2484584 Рос. Федерация №2012119160/08 ; заявл. 10.05.2012 ; опубл. 10.06.2013, Бюл. №16.

6. Радиостанция для независимой работы 10 телефонными и 10 телеграфными каналами : пат. 2523120 Рос. Федерация №2013100479 ; заявл. 09.01.2013 ; опубл. 22.05.2014, Бюл. №20.

#### Об авторах

Дмитрий Геннадьевич Артёмов — асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: DArtemov@kantiana.ru

Виктор Ефимович Пониматкин — канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru

109

#### The authors

Dmitriy G. Artemov, PhD Student, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: DArtemov@kantiana.ru

Dr Viktor E. Ponimatkin, Senior Research Fellow, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru