

Сопряжение широкополосного АЦП с источником сигнала

Роб РИДЕР (Rob REEDER)
rob.reeder@analog.com
Рамья РАМАЧАНДРАН
(Ramya RAMACHANDRAN)
Джим КАЗЕРТА (Jim CASERTA)
jim.caserta@analog.com
Перевод: Дмитрий ИОФФЕ
dsioffe@yandex.ru

Перевод статей из журнала Analog Dialogue “Wideband A/D Converter Front-End Design Considerations” v. 40, No. 3, 2006, и “Wideband A/D Converter Considerations II” v. 41, No. 2, 2007.

Когда надо использовать конфигурацию с двойным трансформатором?

Трансформаторы применяются для изоляции и преобразования несимметричного сигнала в дифференциальный. При разработке схем согласования для скоростных АЦП часто не обращают внимания на то, что трансформаторы никогда не бывают идеальными. При синусоидальном входном сигнале любая несбалансированность трансформатора приводит к искажениям синусоиды на входе АЦП, в результате чего ухудшается качество преобразования. В этой статье мы рассмотрим влияние несогласованности входов АЦП на точность работы АЦП и приведем примеры схем, позволяющих получить хорошие результаты.

О трансформаторах

Большое разнообразие доступных моделей от множества производителей может сбивать с толку при выборе трансформатора. Трудность заключается в разных подходах, предлагаемых изготовителями для определения эффективности. Вследствие этого часто различаются выбор и определение ключевых параметров для спецификации.

При выборе трансформатора для входных цепей конкретного АЦП рассматриваются такие ключевые параметры, как вносимое затухание (insertion loss), потери на отражение (return loss), разбаланс амплитуды (magnitude imbalance) и разбаланс фазы (phase imbalance). Вносимое затухание влияет на полосу пропускания трансформатора. Величина потерь на отражение дает разработчику возможность правильно выбрать нагрузку для согласования трансформатора на заданной частоте или в заданной полосе частот, что особенно важно при коэффициенте трансформации намного больше единицы. Здесь мы сосредото-

чимся на разбалансе амплитуды и фазы и на том, как они влияют на работу АЦП в широкополосных приложениях.

Теоретический анализ

Даже при широкой полосе пропускания связь между несимметрично включенной первичной обмоткой и дифференциальной вторичной, несмотря на линейность, вносит разбаланс амплитуды и фазы. В применении к преобразователю (или к другому устройству с дифференциальным входом) этот разбаланс увеличивает искажения четных гармоник в преобразуемом (или обрабатываемом) сигнале. Обычно пренебрежимо малые на низких частотах, эти искажения становятся заметны в скоростных преобразователях, начиная с частот около 100 МГц. Рассмотрим сначала, как разбаланс фазы и амплитуды дифференциального входного сигнала влияет на работу АЦП (рис. 1).

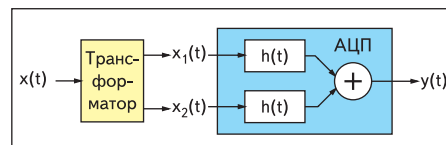


Рис. 1. Упрощенная блок-схема согласования АЦП с использованием трансформатора

Рассмотрим входной сигнал трансформатора $x(t)$. Он преобразуется в пару сигналов $x_1(t)$ и $x_2(t)$. Если $x(t)$ — синусоидальный сигнал, то дифференциальные выходные сигналы $x_1(t)$ и $x_2(t)$ имеют вид:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= k_1 \sin(\omega t), \\ x_2(t) &= k_2 \sin(\omega t - 180^\circ + \varphi) = \\ &= -k_2 \sin(\omega t + \varphi). \end{aligned} \quad (1)$$

АЦП моделируется при помощи симметричной передаточной функции третьего порядка:

$$h(t) = a_0 + a_1 x(t) + a_2 x_2(t) + a_3 x_3(t). \quad (2)$$

Тогда:

$$\begin{aligned} y(t) &= h(x_1(t)) - h(x_2(t)), \\ y(t) &= a_1 [x_1(t) - x_2(t)] + a_2 [x_1^2(t) - x_2^2(t)] + \\ &+ a_3 [x_1^3(t) - x_2^3(t)]. \end{aligned} \quad (3)$$

Идеальный случай — нет разбаланса

Когда $x_1(t)$ и $x_2(t)$ полностью сбалансированы, они имеют одинаковую амплитуду ($k_1 = k_2 = k$), и разность фаз на выходе равна строго 180° ($\varphi = 0$). Следовательно,

$$x_1(t) = k \sin(\omega t), \quad x_2(t) = -k \sin(\omega t), \quad (4)$$

$$y(t) = 2a_1 k \sin(\omega t) + 2a_2 k^3 \sin^3(\omega t). \quad (5)$$

Применим тригонометрическое тождество для мощностей и вынесем за скобки члены с подобными частотами:

$$\begin{aligned} y(t) &= 2 \left(a_1 k + \frac{3a_2 k^3}{4} \right) \sin(\omega t) - \\ &- \left(\frac{a_3 k^3}{4} \right) \sin(3\omega t). \end{aligned} \quad (6)$$

Это обычный для дифференциальной схемы эффект: четные гармоники отличаются от идеального сигнала, а нечетные — нет.

Разбаланс амплитуд

Предположим теперь, что два входных сигнала имеют разбаланс амплитуд, а разбаланс фаз отсутствует. В этом случае $k_1 \neq k_2$ и $\varphi = 0$:

$$x_1(t) = k_1 \sin(\omega t), \quad x_2(t) = -k_2 \sin(\omega t). \quad (7)$$

Подставим выражение (7) в выражение (3) и затем применим тригонометрические тождества для мощностей (8).

$$y(t) = \frac{a_2}{2} (k_1^2 - k_2^2) + \left(a_1 (k_1 + k_2) + \frac{3a_3}{4} (k_1^3 + k_2^3) \right) \sin \omega t - \left(\frac{a_2}{2} (k_1^2 - k_2^2) \right) \cos 2\omega t - \left(\frac{a_3}{4} (k_1^3 - k_2^3) \right) \sin 3\omega t. \quad (8)$$

Из выражения (8) мы видим, что вторая гармоника в этом случае пропорциональна разности квадратов коэффициентов амплитуд k_1 и k_2 , то есть 2-я гармоника пропорциональна выражению

$$k_1^2 - k_2^2. \quad (9)$$

Разбаланс фаз

Теперь предположим, что между двумя входными сигналами есть разбаланс фаз, а разбаланс амплитуд отсутствует. Тогда $k_1 = k_2$ и $\varphi \neq 0$.

$$\begin{aligned} x_1(t) &= k_1 \sin(\omega t), \\ x_2(t) &= -k_1 \sin(\omega t + \varphi). \end{aligned} \quad (10)$$

Подставим выражение 10 в выражение 3 и упростим (11).

Из выражения 11 можно видеть, что амплитуда второй гармоники пропорциональна квадрату коэффициента при амплитуде k . 2-я гармоника пропорциональна выражению

$$k_1^2. \quad (12)$$

Наблюдения

Сравнение выражений 9 и 12 показывает, что на амплитуду второй гармоники разбаланс фаз оказывает большее влияние, чем разбаланс амплитуд. Для разбаланса фаз вторая гармоника пропорциональна квадрату k_1 , в то время как для разбаланса амплитуд вторая гармоника пропорциональна разности квадратов k_1 и k_2 . Если k_1 и k_2 приблизительно равны, то эта разность мала.

Чтобы проверить правильность этих расчетов, был написан код MATLAB для описанной выше модели. Он позволяет вычислить и проиллюстрировать влияние разбаланса амплитуды и фазы на гармонические искажения высококачественного АЦП с трансформаторным входом:

```
% Matlab code to study the effect of magnitude and phase imbalance
of input
% signals on the output
% Oct 19, 2005
clear all; close all;
% Error terms that can be set by the user
magnErrdB = 0; %in dB
phaseErr = 50; %in degrees
sd_noise = 100e-6; %std dev of noise
% Convert dB magnErr to voltage level
magnErr = 10^(magnErrdB/20);
% Coefficients
a0=0; %dc offset
a1=0.89; a2=0.00038; a3=0.0007; %coefficients
of 1st,2nd,3rd harmonics
%to match AD9445
typical FFT
fin = 100; %input freq — does not affect
calculations
t = 0:1:2047;
%Input signals
x1 = 0.5*sin((t/2048)*2*pi*fin);
x2 = 0.5*(magnErr)*sin(((t/2048)*2*pi*fin)-pi-
(phaseErr*pi/180));
%Each differential signal multiplied by the
transfer function
y1 = a0 + a1*x1 + a2*x1.^2 + a3*x1.^3;
y2 = a0 + a1*x2 + a2*x2.^2 + a3*x2.^3;
%Output
y = y1 - y2;
noise = sd_noise*randn(1,length(y));
```

$$\begin{aligned} y(t) &= \left(a_1 k_1 + \frac{3a_3 k_1^3}{4} \right) (\sin \omega t + \sin \omega t \cos \varphi + \cos \omega t \sin \varphi) \\ &- \left(\frac{a_2 k_1^2}{2} \right) (\cos 2\omega t - \cos 2\omega t \cos 2\varphi + \sin 2\omega t \sin 2\varphi) \\ &- \left(\frac{a_3 k_1^3}{4} \right) (\sin 3\omega t - \sin 3\omega t \cos 3\varphi + \cos 3\omega t \sin 3\varphi). \end{aligned} \quad (11)$$

```
y = y + noise;
% figure; plot(1000*t(1:80),x1(1:80),1000*t(1:8
0),x2(1:80),1000*t(1:80),y(1:80));
%Take the FFT
fft_y = fft(y/1024, 2048);
Pyy = 10*log10(fft_y.*conj(fft_y));
freq_axis = 0:1:1023;
% figure; plot(freq_axis, Pyy(1:1024), '-d');
% title('Frequency content of the output');
% xlabel('Frequency (Hz)');
% axis tight;
%Print fundamental and 2nd, 3rd harmonics
f = Pyy(101)
h2 = Pyy(201)
h3 = Pyy(301)
```

Эта модель включает аддитивный белый гауссов шум.

Коэффициенты a_i , использованные в модели MATLAB, соответствуют высококачественному 16-разрядному 125-мегагерцовому АЦП AD9445. Этот преобразователь, включенный по схеме, показанной на рис. 2, был использован для генерации БПФ (рис. 3),

из которого и были получены искомые коэффициенты.

Шумовой фон, вторая гармоника и третья гармоника здесь отражают работу преобразователя совместно с входной схемой согласования. Коэффициенты искажений преобразователя (a_2 и a_3) и шумы были вычислены исходя из результатов этих измерений в сочетании с разбалансом амплитуды 0,0607 дБ и разбалансом фазы 14° на частоте 170 МГц, специфицированных для стандартного трансформатора с коэффициентом трансформации 1:1.

Эти коэффициенты были использованы в выражениях 8 и 11 для расчета $y(t)$. Разбаланс амплитуды изменялся в диапазоне от 0 до 1 В, а разбаланс фазы — от 0 до 50° (диапазоны разбаланса для типового трансформатора в полосе от 1 до 1000 МГц). При этом наблюдались изменения второй гармоники. Результаты моделирования показаны на рис. 4 и 5.

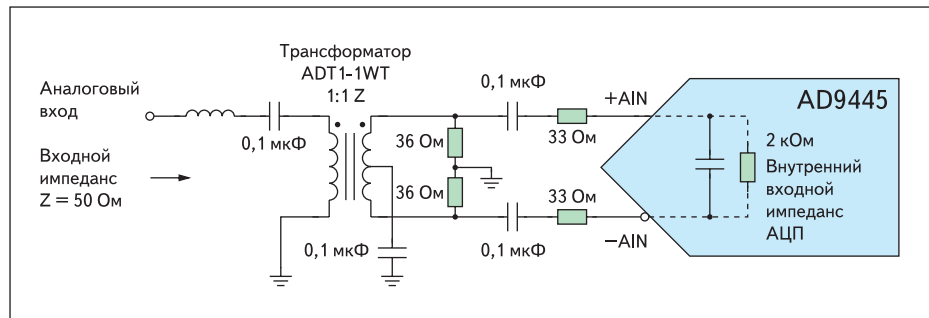


Рис. 2. Подключение входа АЦП AD9445 через трансформатор

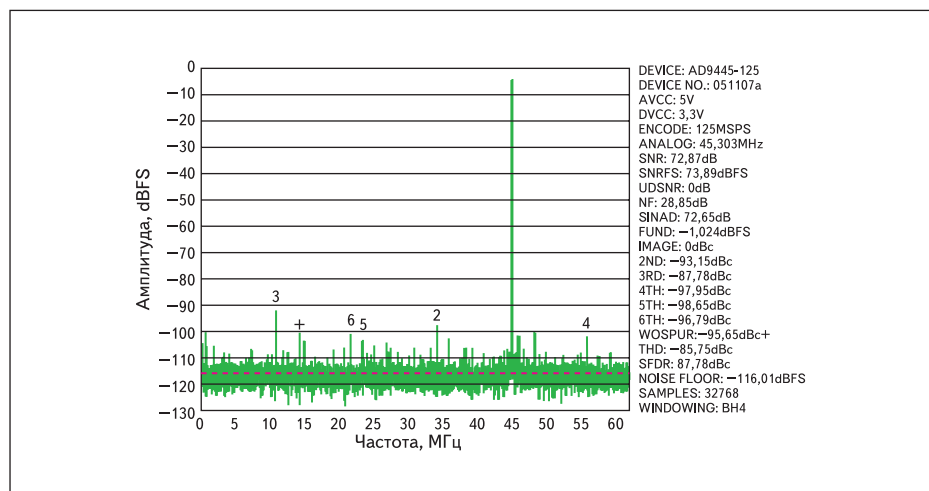


Рис. 3. Типовое БПФ для AD9445, 125 МГц, входная частота 170 МГц

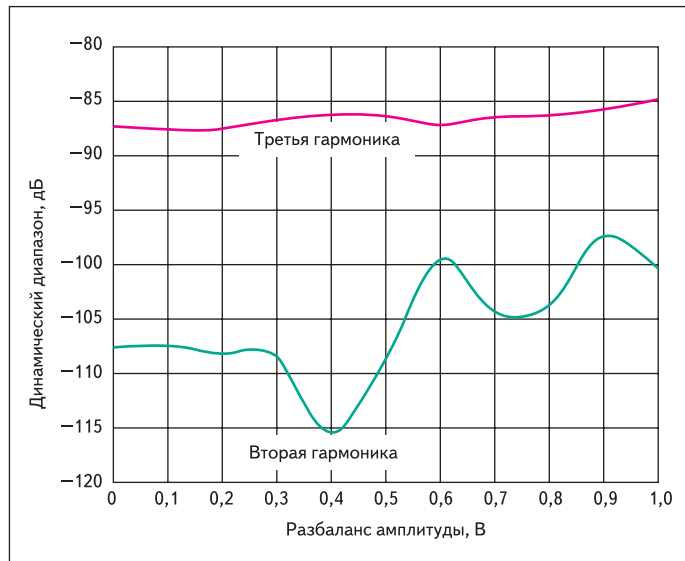


Рис. 4. Зависимость гармоник только от разбаланса амплитуд

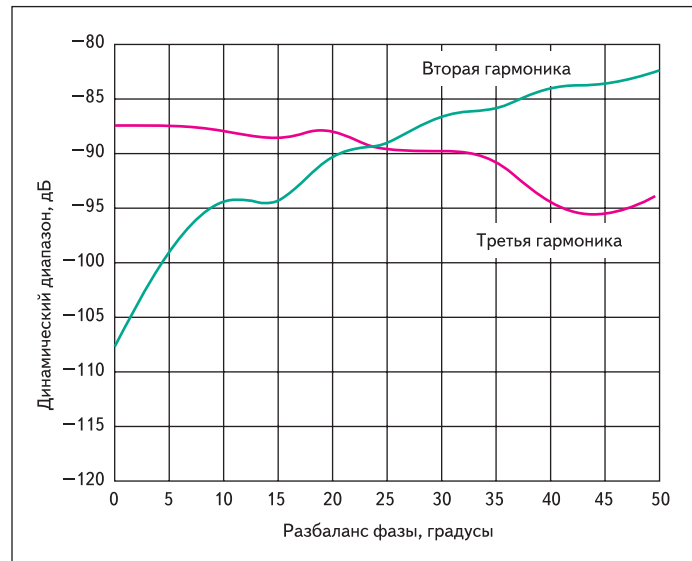


Рис. 5. Зависимость гармоник только от разбаланса фаз

Рис. 4 и 5 показывают, что: а) третья гармоника относительно нечувствительна к разбалансу амплитуды и фазы; б) вторая гармоника быстрее ухудшается с разбалансом фазы, чем с разбалансом амплитуды.

Таким образом, для достижения лучшего качества работы АЦП требуется конфигурация трансформатора с наименьшим разбалансом фазы. Две возможные конфигурации — одна с симметрирующими трансформаторами (balun), другая с двойным трансформатором — показаны на рис. 6 и 7.

Разбаланс для этих конфигураций сравнивался с помощью векторного анализатора схем (network analyzer) на специально разработанной плате. На рис. 8 и 9 сравнивается разбаланс амплитуды и фазы для этих конфигураций и для одного трансформатора.

На этих рисунках хорошо видно, что сдвоенные конфигурации имеют лучший

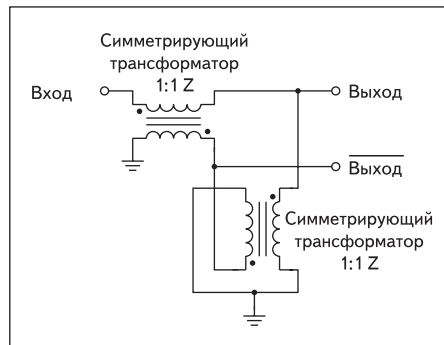


Рис. 6. Конфигурация с симметрирующими трансформаторами

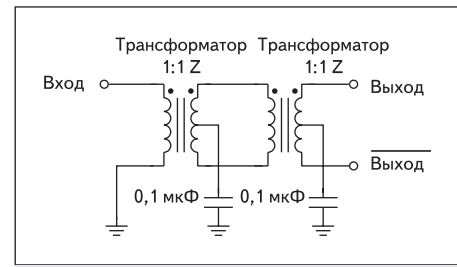


Рис. 7. Конфигурация с двойным трансформатором

разбаланс фазы за счет медленно деградирующего разбаланса амплитуды. Поэтому, как следует из результатов приведенного выше анализа, конфигурации с двумя трансформаторами могут быть использо-

ваны для уменьшения искажений. На графиках БПФ для AD9445 с использованием одиночного трансформатора на входе (рис. 10) и двух симметрирующих трансформаторов (рис. 11) показан пример, когда SFDR улучшается на 10 дБ при частоте сигнала ПЧ 300 МГц.

Означает ли все это, что для получения высокого качества необходимо использовать на

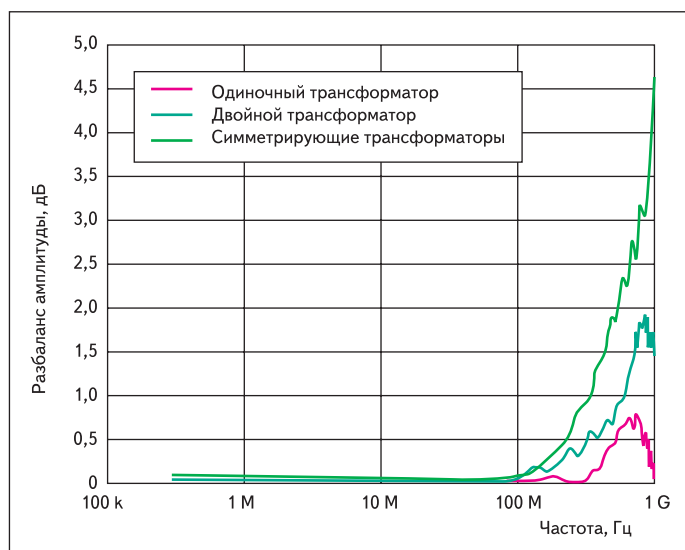


Рис. 8. Разбаланс амплитуд от 1 МГц до 1000 МГц

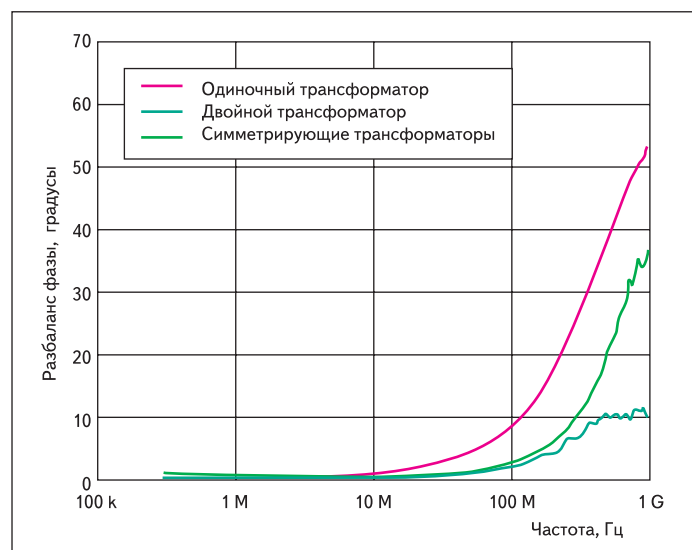


Рис. 9. Разбаланс фазы от 1 МГц до 1000 МГц

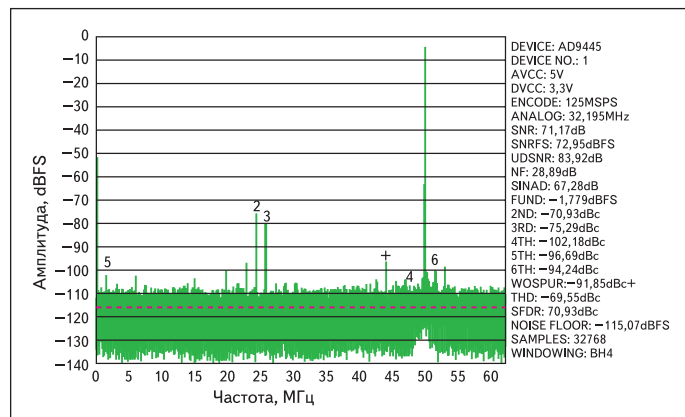


Рис. 10. БПФ для AD9445, одиночный трансформатор на входе, 125 МГц, ПЧ = 300 МГц

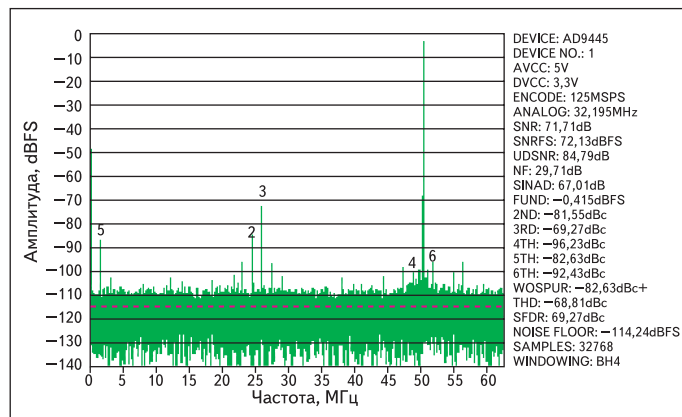


Рис. 11. БПФ для AD9445, два симметрирующих трансформатора на входе, 125 МГц, ПЧ = 300 МГц

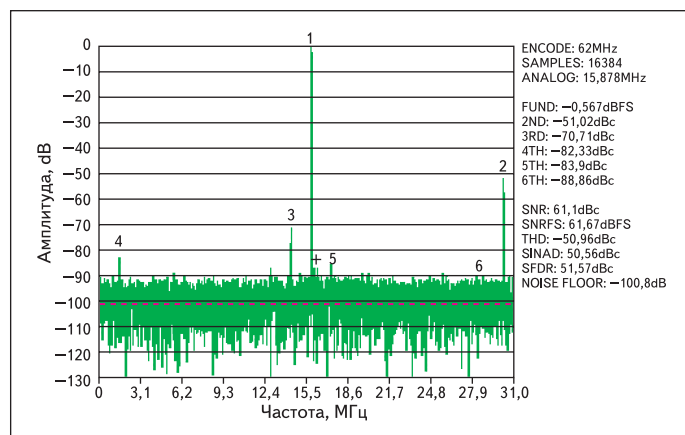


Рис. 12. БПФ АЦП AD9238 с одним трансформатором на входе, частота отсчетов 62 МГц, ПЧ = 170 МГц при -0,5 дБ полной шкалы, вторая гармоника -51,02 дБс

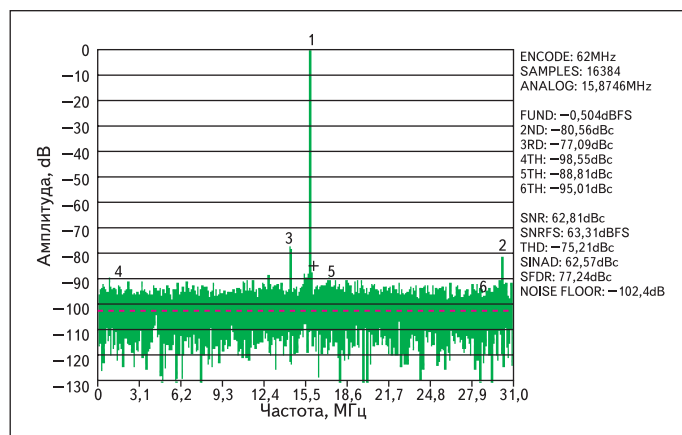


Рис. 13. БПФ АЦП AD9238 с одним трансформатором на входе, частота отсчетов 62 МГц, ПЧ = 170 МГц при -0,5 дБ полной шкалы, вторая гармоника -80,56 дБс

входе АЦП два трансформатора? Нет, не обязательно. Анализ показывает, что самое главное при использовании трансформатора — это очень малый разбаланс фаз. В следующих примерах (рис. 12 и 13) используется два разных одиночных трансформатора на входе АЦП AD9238 при обработке сигнала ПЧ с частотой 170 МГц. Этот пример показывает улучшение передачи второй гармоники на 29 дБ, когда перед АЦП ставится трансформатор с улучшенным разбалансом фазы на высоких частотах.

Сравнение усилителя и трансформатора на входе АЦП

Разработка схемы сопряжения входа высокопроизводительного АЦП с источником сигнала (front end) имеет очень большое значение для достижения требуемого качества работы системы. Оптимизация проекта зависит от многих факторов, включая область применения, состав системы и архитектуру АЦП. Предлагаем вниманию читателей практические соображения, которые необходимо учитывать при разработке устройств сопряжения АЦП с использованием схем на усилителях и трансформаторах.

Фундаментальное различие между усилителями и трансформаторами

Усилитель — это активный элемент, а трансформатор — пассивный. Усилители, подобно другим активным элементам, потребляют мощность от источника питания и вносят шумы. Трансформаторы не потребляют мощности, и вносимые ими шумы пренебрежимо малы.

Когда лучше использовать усилитель

По сравнению с трансформаторами, усилителям присущи некоторые ограничения. Если необходимо сохранить постоянную составляющую сигнала, то надо использовать усилитель, потому что трансформатор по своей природе является развязывающим устройством. С другой стороны, при необходимости, трансформатор может обеспечить гальваническую развязку. В усилителе легче получить усиление сигнала, так как его выходной импеданс практически не зависит от усиления. С другой стороны, выходной импеданс трансформатора увеличивается пропорционально квадрату усиления, которое зависит от коэффициента трансформации. Усилитель обеспечивает плоскую передаточную кривую, свободную от выбросов, которые дают паразитные связи в трансформаторе.

Шумы, вносимые усилителем, и методы их уменьшения

Рассмотрим для примера типичный усилитель ADA4937, включенный с коэффициентом усиления $G = 1$. Шумы на его выходе на высоких частотах имеют спектральную плотность $6 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$, сравнимую со входной спектральной плотностью шумов $10 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ у 80-мегагерцового АЦП AD9446-80. Проблема здесь заключается в том, что усилитель имеет полосу шумов, эквивалентную полной полосе АЦП (около 500 МГц), в то время как шумы АЦП укладываются в зону Найквиста (40 МГц). Без применения фильтра интегральный шум составляет 155 мкВ rms для усилителя и 90 мкВ rms для АЦП. Теоретически, это ухудшает общее соотношение «сигнал-шум» в системе (SNR) на 6 дБ. Это было подтверждено экспериментально: соотношение «сигнал-шум», которое дают совместно усилитель ADA4397 и АЦП AD9446-80, составляет 76 дБ полной шкалы, а уровень шумовой дорожки равен -118 дБ (рис. 14). При использовании трансформатора SNR равно 82 дБ полной шкалы. Таким образом, согласующий усилитель ухудшает соотношение «сигнал-шум» на 6 дБ.

Чтобы улучшить соотношение «сигнал-шум», между усилителем и АЦП вставляется

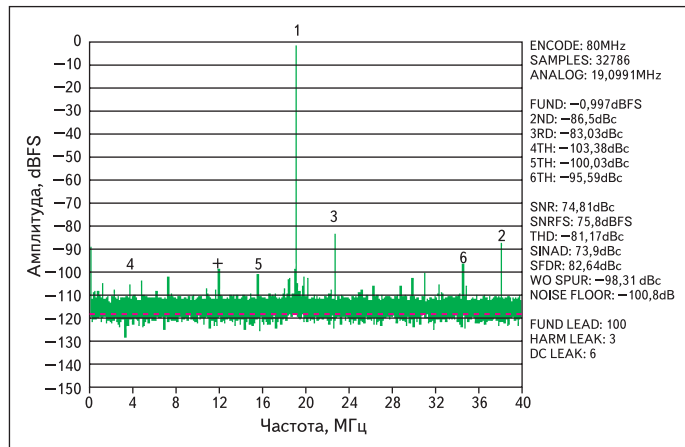


Рис. 14. Усилитель ADA4937 на входе АЦП AD9446-80 при частоте преобразования 80 МГц без фильтрации шумов

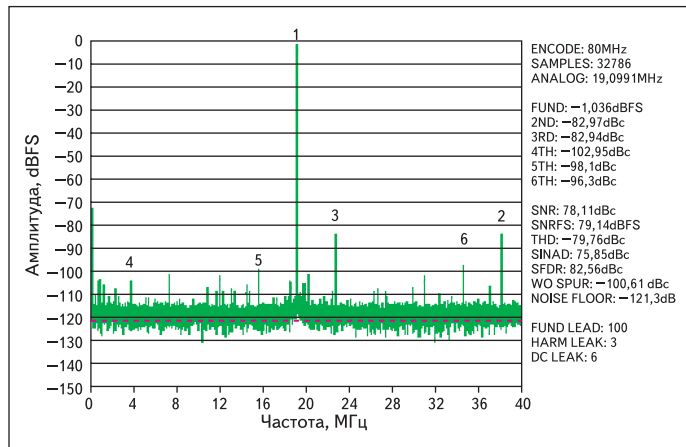


Рис. 15. Фильтр с полосой 100 МГц на входе AD9446-80

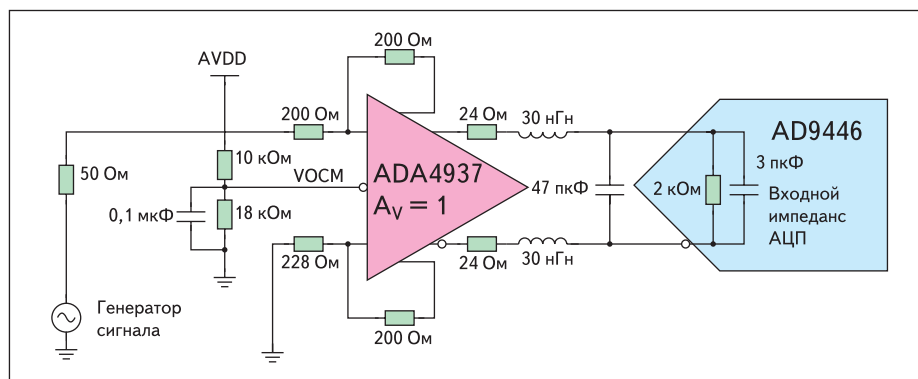


Рис. 16. Схема включения усилителя ADA4937 с фильтром второго порядка на входе АЦП AD9446-80

фильтр. При использовании 100-мегагерцового фильтра второго порядка интегральный шум усилителя доходит до 71 мкВ rms, ухудшая SNR АЦП только на 3 дБ. Использование фильтра второго порядка улучшает характеристику SNR, показанную на рис. 14, до 79 дБ полной шкалы при шумовой дорожке -121 дБ, как показано на рис. 15. Этот фильтр состоит из резисторов с сопротивлением 24 Ом и индуктивностей 30 нГн, соединенных последовательно с каждым выходом усилителя, а также дифференциально подключенного конденсатора емкостью 47 пФ (рис. 16).

Сравнение потребляемой мощности быстродействующих усилителей и АЦП

Разумеется, потребляемая мощность зависит от типа устройства. Например, два типичных усилителя с похожим потреблением: AD8352 потребляет 37 мА при напряжении питания 5 В (185 мВт), а ADA4937 — 40 мА при 5 В (200 мВт). Потребляемую мощность можно снизить на одну треть, если использовать напряжение питания 3,3 В (за счет незначительного ухудшения параметров). Потребляемая мощность для разных типов АЦП различается значительно больше, в зависимости от разрядности и скорости. 16-разрядный 80-мегагерцовый AD9446-80 потребляет

от 2,4 Вт, 14-разрядный 125-мегагерцовый AD9246-125 потребляет 415 мВт, а 12-разрядный 20-мегагерцовый AD9235-20 — всего 95 мВт.

Когда необходимо использовать трансформатор?

Трансформаторы, в отличие от усилителей, обеспечивают лучшее качество на очень высоких частотах. Кроме того, они вносят в сигнал намного меньше шумов, чем усилители.

Сравнение усиления усилителей и трансформаторов

Основная разница заключается в их выходном импедансе, который непосредственно влияет на полосу пропускания системы. Отношение входного и выходного импеданса трансформатора пропорционально квадрату коэффициента трансформации, в то время как входной и выходной импедансы усилителя практически не зависят от усиления.

Например, при коэффициенте усиления $G = 2$ трансформатор с входным импедансом 50 Ом имеет выходной импеданс 200 Ом. АЦП AD9246 имеет дифференциальную входную емкость 4 пФ. В сочетании с выходным импедансом трансформатора эта емкость сократит полосу пропускания на уров-

не -3 дБ с 650 МГц до 200 МГц. Часто для улучшения качества сигнала и подавления выбросов в АЦП требуются дополнительные последовательные резисторы и дифференциально включенная емкость, в результате чего возможно сужение полосы до 100 МГц.

При использовании усилителя с низким импедансом, например, ADA4937, можно получить источник сигнала с очень низким импедансом, обычно менее 5 Ом. Последовательно с каждым входом АЦП могут быть включены резисторы сопротивлением 25 Ом для ограничения переходных процессов. В этом случае возможно использование всей полосы пропускания аналогового входа АЦП AD9246, равной 650 МГц.

До сих пор мы обсуждали полосу пропускания на уровне -3 дБ. Когда требуется более плоская передаточная характеристика, например, 0,5 дБ в системах первого порядка, полосу на уровне -3 дБ надо увеличить примерно в три раза. Для неравномерности в 0,1 дБ надо умножить на коэффициент около 6,5. Если в полосе 150 МГц требуется неравномерность 0,5 дБ, то потребуются полоса в 450 МГц по уровню -3 дБ, которую трудно получить на трансформаторе с усилением $G = 2$, но легко обеспечить при помощи усилителя с низким выходным импедансом.

Факторы, влияющие на выбор между трансформатором и усилителем

Они могут быть сведены к полудюжине параметров, перечисленных в таблице.

Таблица. Параметры, влияющие на выбор между трансформатором и усилителем

| Параметр | Обычный выбор |
|------------------------------------|---|
| Полоса пропускания | Трансформатор |
| Усиление | Усилитель |
| Равномерность полосы пропускания | Усилитель |
| Рассеиваемая мощность | Трансформатор |
| Шумы | Трансформатор |
| Сохранение постоянной составляющей | Усилитель (сохранение постоянной составляющей) Трансформатор (развязка по постоянной составляющей) |

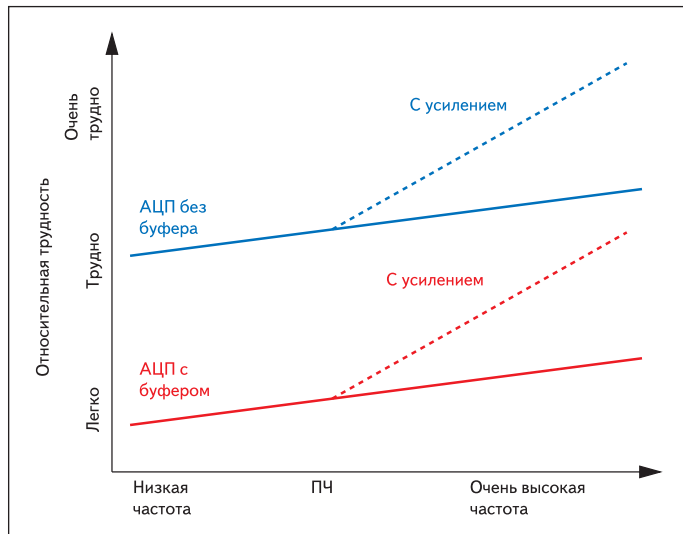


Рис. 17. Зависимость относительной сложности разработки от частоты

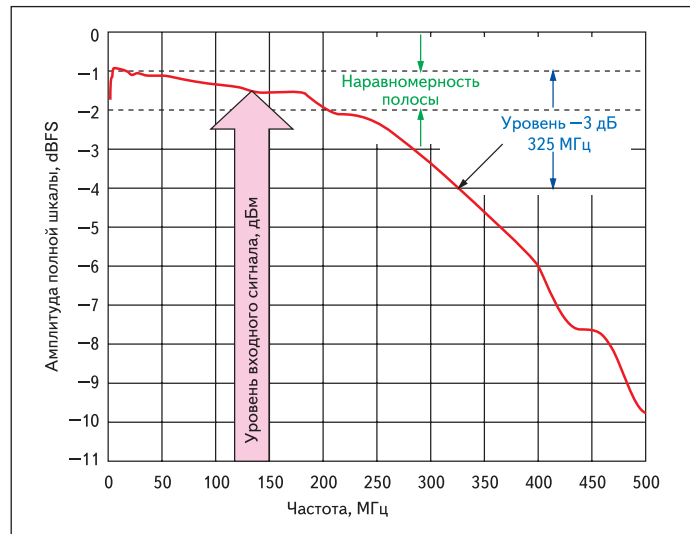


Рис. 19. Полоса пропускания, неравномерность и уровень входного сигнала

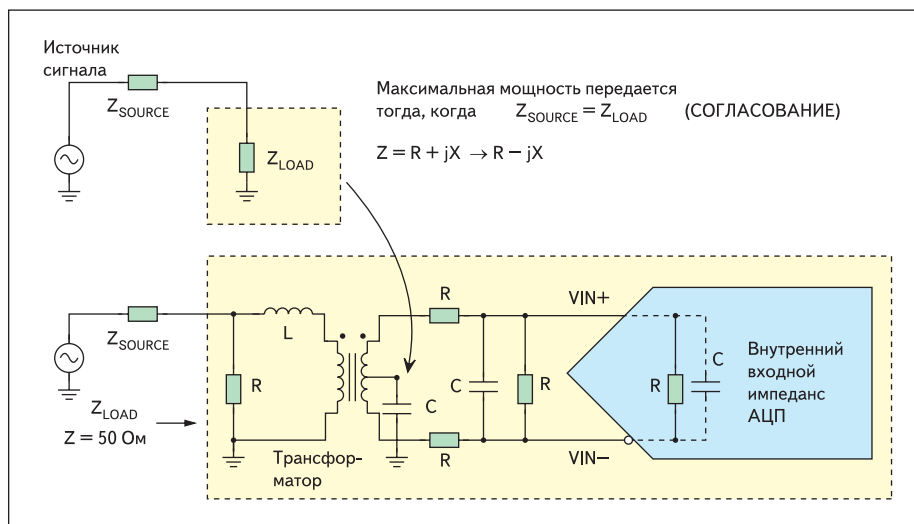


Рис. 18. Максимум передаваемой мощности

Для применений, в которых ключевые требования противоречат друг другу, необходим дополнительный анализ и компромиссы.

Некоторые соображения для дополнительного анализа

Начать следует с понимания характера трудностей сопряжения конкретного АЦП с источником сигнала. Прежде всего, АЦП бывают со встроенным буфером или без буфера (например, с переключаемыми конденсаторами). Естественно, в обоих случаях уровень сложности увеличивается с увеличением частоты. Модели с переключаемыми конденсаторами создают больше трудностей для разработчика.

Если для полного использования входного диапазона АЦП необходимо усиление, то в приложении, в котором по всем прочим признакам желательно использовать трансформатор, возникнут большие сложности при увеличении усиления (коэффициента трансформации).

Несомненно, трудности увеличиваются с возрастанием частоты. Разработка системы для ПЧ ниже 100 МГц с буферизованным АЦП будет проще высокочастотного проекта с низким уровнем сигнала и АЦП без буфера (рис. 17). Когда множество различных параметров толкает к выбору разных направлений, поиск компромиссного решения может оказаться очень трудным.

Возможно, будет удобно свести все параметры в электронную или простую таблицу, чтобы сохранять их по мере продвижения проекта. Не может быть оптимального проекта на все случаи жизни. Выбор будет зависеть, в частности, от доступности компонентов и специфики применения.

Несколько слов о параметрах системы в сложных проектах

Первое и самое важное, что необходимо помнить при разработке согласования АЦП с источником сигнала: каждый компонент должен рассматриваться как часть нагрузки

предыдущего каскада. Максимальная мощность передается тогда, когда импеданс источника сигнала согласован с импедансом приемника (рис. 18).

Теперь рассмотрим параметры проекта:

- Входной импеданс — это характеристический импеданс проекта. В большинстве случаев он равен 50 Ом, но возможны и другие значения. Трансформатор хорошо подходит для согласования импедансов. Он позволяет разработчику согласовать требования к различным характеристикам импеданса, которые необходимы для полного баланса всех нагрузок в системе. В схеме с усилителем импеданс задается как входная и выходная характеристика, которая может не зависеть от частоты, как в случае с трансформатором.
- Коэффициент стоячей волны по напряжению (KCBH, Voltage standing-wave ratio, VSWR) — это безразмерная величина, которую можно использовать для оценки мощности, отразившейся от нагрузки в заданной полосе частот.
- Полоса пропускания — это диапазон частот, используемых в системе. Она может быть широкой или узкой, однополосной или покрывать несколько зон Найквиста. Граничная частота обычно определяется по уровню -3 дБ.
- Неравномерность полосы пропускания (она же неравномерность усиления) определяет величину (положительную или отрицательную) изменения передаточной функции в заданной полосе частот. Она может быть пульсирующей или монотонной, подобно характеристике фильтра Баттерворта. В любом случае, неравномерность полосы пропускания обычно должна быть не больше 1 дБ и является критичной для общего усиления системы.
- Уровень входного сигнала определяется усилением системы, необходимым для конкретного применения. Он неразрывно свя-

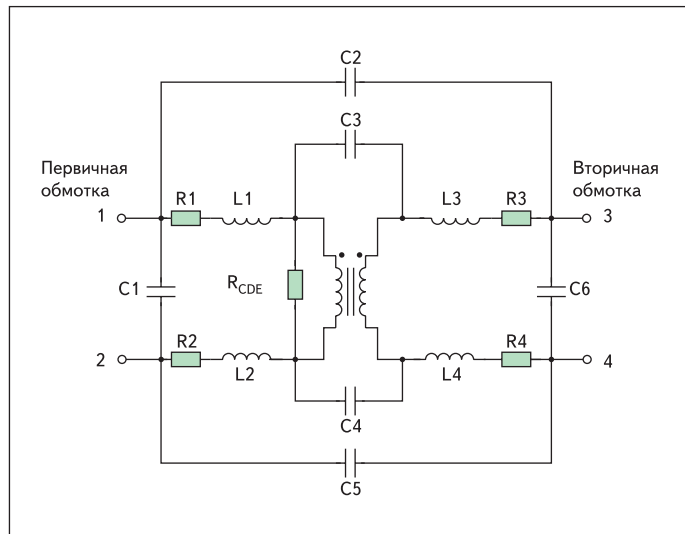


Рис. 20. Модель трансформатора

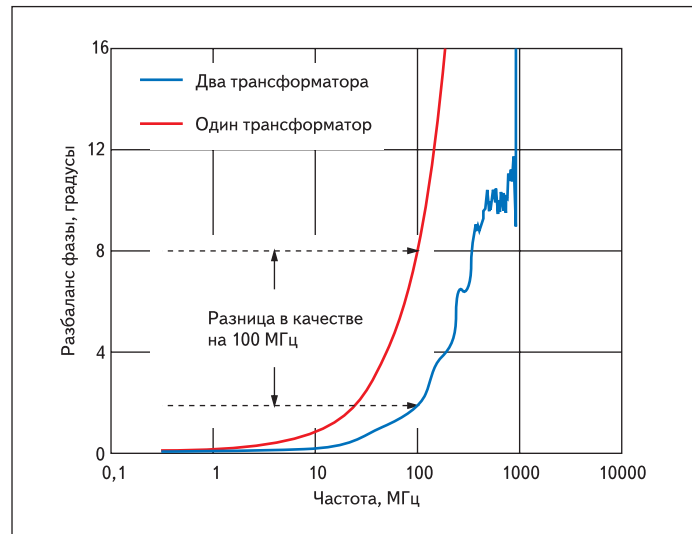


Рис. 21. Разбаланс фазы для конфигураций с одним и с двумя трансформаторами

зан с полосой пропускания и зависит от компонентов, выбранных для схемы согласования, таких как фильтр или усилитель (трансформатор). Выполнение требований по этому параметру может вызвать наибольшее количество трудностей.

- Соотношение «сигнал-шум» (Signal-to-noise ratio, SNR) — это логарифм отношения среднеквадратичной величины сигнала полной шкалы к квадратному корню из суммы квадратов всех шумовых составляющих в заданной полосе частот, без учета искажений. SNR ухудшается с увеличением полосы пропускания, джиттера и усиления (при большом усилении шумы усилителя, пренебрежимо малые при малом усилении, могут вносить значительный вклад в общий шум).
- Свободный от искажений динамический диапазон (Spurious-free dynamic range, SFDR) — это отношение среднеквадратичной величины полной шкалы к среднеквадратическому значению наибольшей спектральной составляющей искажений. Две наибольших составляющих искажений — это нелинейность усилителя (или несбалансированность трансформатора), которая вызывает наибольшее искажение второй гармоники, и несогласованность входа, вклад которой растет с усилением (при большом усилении согласование затруднено, и паразитные нелинейности усиливаются), обычно наблюдаемая как искажение третьей гармоники.

Основные характеристики трансформаторов

Трансформаторы имеют множество характеристик: усиление по напряжению, отношение импедансов, полоса пропускания, вносимые потери, разбаланс амплитуды и фазы и потери на отражение. Кроме того, возможны требования по номинальной мощности, типу конфигурации (обычный или симмет-

рирующий трансформатор) и наличию ответвления от средней точки обмотки.

Разработка схемы с трансформатором не всегда проходит гладко. Например, характеристики трансформатора изменяются с частотой, это усложняет моделирование. Пример отправной точки при моделировании трансформатора для АЦП показан на рис. 20. Каждый из параметров будет зависеть от выбранного трансформатора. Поэтому целесообразно обратиться к изготовителю трансформатора за моделью данного трансформатора, если она существует.

Другие характеристики трансформаторов:

- Коэффициент трансформации (Turns ratio) — это отношение напряжения на вторичной обмотке к напряжению первичной обмотки.
- Коэффициент токов (Current ratio) обратно пропорционален коэффициенту трансформации.
- Отношение импедансов равно квадратному корню из коэффициента трансформации.
- Усиление сигнала в идеале равно коэффициенту трансформации. Несмотря на то, что усиление по напряжению по своей природе свободно от шумов, тут есть некоторые нюансы, рассматриваемые далее.
- Трансформатор можно упрощенно рассматривать как полосовой фильтр с номинальным усилением. Вносимые потери, потери в фильтре в заданном диапазоне частот, обычно можно найти в справочных данных, но этот вопрос также требует некоторых уточнений.
- Потери на отражение являются мерой несогласованности эффективного импеданса нагрузки вторичной обмотки со стороны первичной обмотки. Например, если квадрат отношения числа витков вторичной обмотки к первичной равен 2:1, то можно ожидать, что первичная обмотка будет иметь входной импеданс 50 Ом,

если вторичная будет нагружена на 100 Ом. Однако это соотношение не выполняется строго: например, отраженный на первичную обмотку импеданс изменяется с частотой. В общем случае, с увеличением отношения импедансов увеличиваются потери на отражение.

- Амплитудный и фазовый разбаланс — это важнейшие характеристики, влияющие на качество трансформатора. Эти две характеристики позволяют разработчику оценить нелинейность в его будущем проекте на частотах свыше 100 МГц. При увеличении частоты нелинейность трансформатора также увеличивается. Обычно доминирует разбаланс фазы, который влияет на искажения четных гармоник (в основном, второй).

На рис. 21 показан типичный разбаланс фазы как функция частоты для конфигураций с одним и двумя трансформаторами.

Следует помнить, что не все трансформаторы одинаково специфицируются производителями, и трансформаторы, кажущиеся похожими по своим справочным данным, могут вести себя по-разному в одной и той же ситуации. Наилучший способ выбрать трансформатор для вашего проекта — это сбор и обдумывание спецификаций на все рассматриваемые трансформаторы, а также запрос у производителя любых важных данных, отсутствующих в справочниках. Альтернативным или дополнительным методом может служить самостоятельное измерение параметров при помощи схемного анализатора.

Важнейшие параметры усилителя

Принципиальное основание для использования усилителя вместо трансформатора — это необходимость получения как можно более равномерной передаточной характеристики в полосе пропускания. Если этот параметр важен для вашего проекта, то усилитель может обеспечить его на уровне $\pm 0,1$ дБ. Трансформатор имеет пульсирующую характерис-

тику и требует «точной подгонки» для выравнивания неравномерности.

Другое преимущество усилителя — это его нагрузочная способность. Трансформаторы не могут работать на длинные проводники на печатной плате. Они предназначены для непосредственного подключения к АЦП. Если в системе требуется удалить драйвер или развязку от АЦП или даже разместить их на другой плате, то настоятельно рекомендуется использовать усилитель.

Сохранение постоянной составляющей также может быть основанием для выбора усилителя, так как трансформаторы по своей природе на это не способны. Некоторые высокочастотные усилители могут передавать все нижние частоты вплоть до постоянного напряжения, если эта часть спектра важна для данного применения. Типовыми усилителями для таких приложений являются AD8138 и ADA4937.

Усилители также могут обеспечить динамическую изоляцию, примерно от 30 до 40 дБ обратной изоляции при подавлении выбросов тока на входах небуферизованного АЦП.

Если в проекте требуется усиление в широкой полосе частот, то усилитель обеспечит лучшее согласование со входами АЦП, чем трансформатор.

Еще один компромисс — это выбор между полосой пропускания и шумами. Для проектов с частотами свыше 150 МГц трансформатор обеспечивает лучшие SNR и SFDR. Однако в первой или второй зоне Найквиста можно использовать как усилители, так и трансформаторы.

Лучшие усилители фирмы Analog Devices для работы с высококачественными АЦП

Фирма выпускает группу усилителей, хорошо приспособленных для согласования

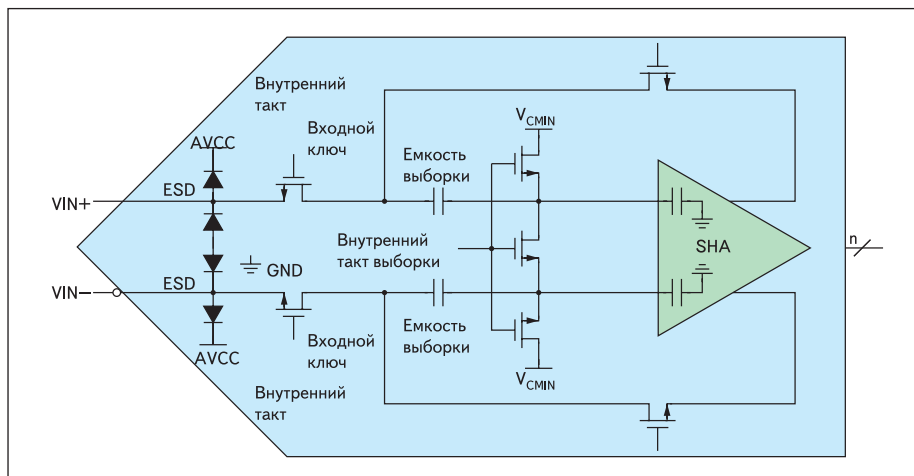


Рис. 22. Блок-схема входного каскада АЦП на переключаемых конденсаторах

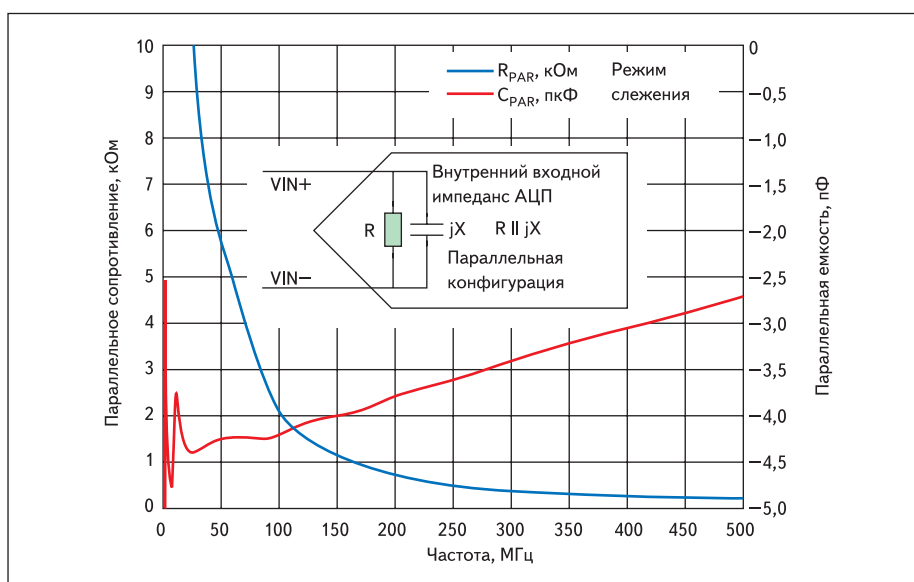


Рис. 23. Типичный график входного импеданса АЦП на переключаемых конденсаторах в режиме слежения

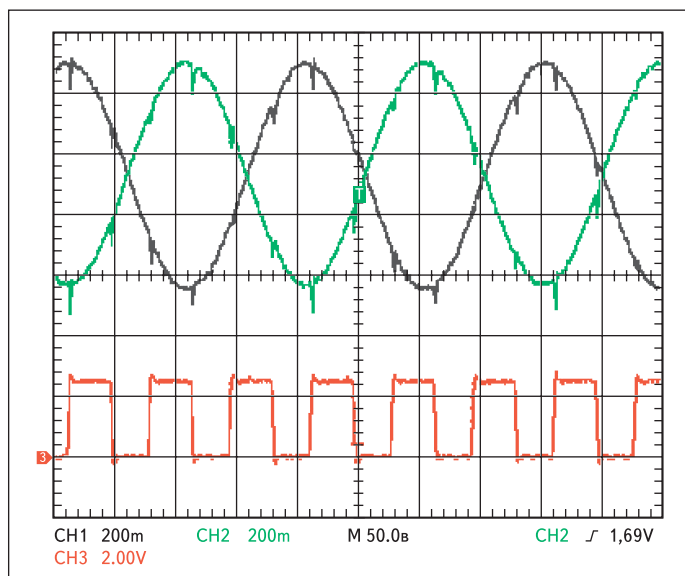


Рис. 24. Несимметричный входной сигнал АЦП на переключаемых конденсаторах относительно перепадов импульсов тактовой частоты

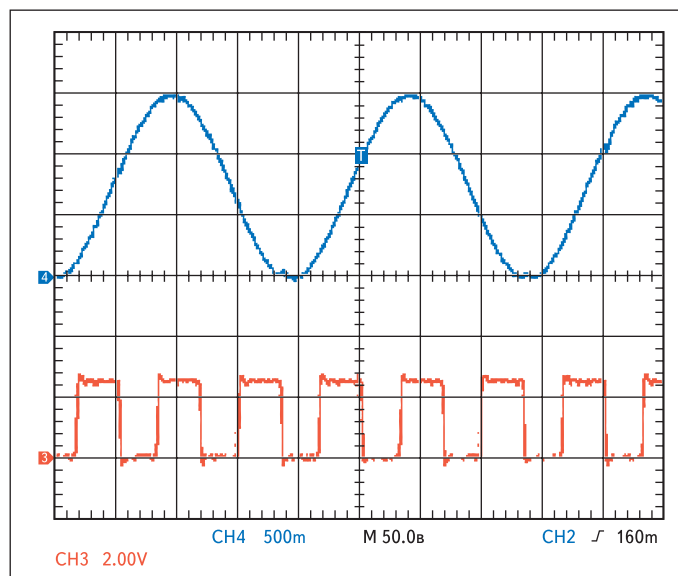


Рис. 25. Дифференциальный входной сигнал АЦП на переключаемых конденсаторах относительно перепадов импульсов тактовой частоты

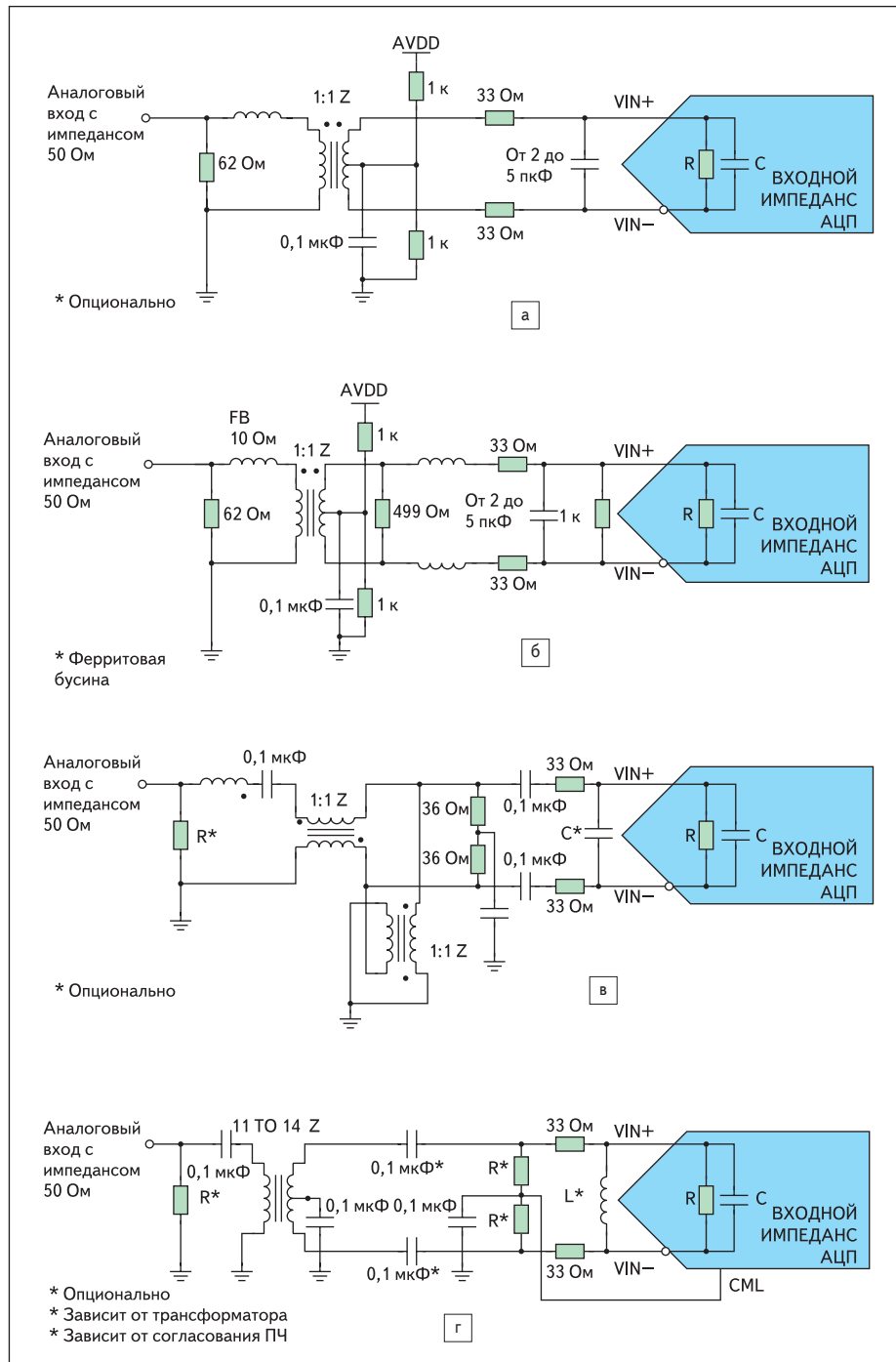


Рис. 26. Согласование входа АЦП при помощи трансформатора: а) узкополосные приложения; б) широкополосные приложения; в) высокочастотные приложения; г) резонансные приложения

скоростных АЦП с источниками сигналов. Это AD8138 и AD8139, AD8350, AD8351, AD8352, ADA4937 и ADA4938.

AD8139 обычно используется в узкополосных приложениях, где область входных частот меньше 50 МГц. Для проектов с высокой ПЧ обычно применяется AD8352. Этот усилитель обеспечивает хорошее подавление шумов и искажений в широкой полосе частот, до 200 МГц. ADA4937 может быть использован для частот до 150 МГц, его основное преимущество — удобство использования в схемах с сохранением постоянной

составляющей, так как он может работать в широком диапазоне входных синфазных напряжений.

Важнейшие характеристики АЦП

Популярные КМОП АЦП с переключаемыми конденсаторами не имеют встроенного буфера на входе, и они потребляют меньшую мощность, чем модели с буфером. Внешний источник сигнала подключается прямо к внутренней схеме выборки-хранения на переключаемых конденсаторах (рис. 22). Это создает две проблемы. Во-первых, входной импеданс

зависит от времени и от переключения между режимами выборки и хранения. Во-вторых, заряд, инжектируемый в запоминающий конденсатор, отражается обратно в источник сигнала. Это может вызывать задержку установления в пассивном фильтре источника сигнала.

Очень важно согласовать внешнюю цепь со входом АЦП в режиме слежения, как показано на рис. 23. На этом рисунке видно, что действительная (резистивная) часть входного импеданса (синяя линия) очень велика (до нескольких кОм) на низких частотах и спадает ниже 2 кОм при частоте выше 100 МГц.

Мнимая, или емкостная составляющая входного импеданса, показанная красной линией, начинается с довольно большого значения емкости и примерно до 3 пФ (правая шкала) на высоких частотах.

Согласование такой структуры входа является серьезной проблемой для разработчика, особенно на частотах выше 100 МГц.

Графики на рис. 24 и 25 иллюстрируют преимущества дифференциальных сигналов. На первый взгляд, график сигнала на одиночном несимметричном входе АЦП на рис. 24 выглядит нормально. Однако на рис. 25 видно, что искажения сигнала на одиночных графиках сглаживаются синфазным эффектом.

Глядя на дифференциальный входной сигнал на рис. 25, можно заметить, что он гораздо чище. Помехи от перепадов тактовой частоты исчезли. Подавление синфазных помех, присущее дифференциальному сигналу, уменьшает помехи по питанию, от цифровых источников или от инжектированных зарядов.

АЦП с буфером на входе проще для понимания и применения. Входной источник нагружен на постоянный импеданс. Буфер — это транзисторный каскад, который обеспечивает низкий выходной импеданс. Благодаря этому помехи от переключаемых процессов значительно уменьшаются. В отличие от АЦП на переключаемых конденсаторах, согласование входа почти не изменяется с частотой, что облегчает выбор драйвера. Буфер специально разрабатывается как очень линейный и малопотребляющий каскад. Его недостатком является только увеличение потребляемой мощности АЦП.

Несколько примеров схем с усилителями и трансформаторами

На рис. 26 показаны четыре примера конфигурации входа АЦП с применением трансформаторов.

Для узкополосных применений (рис. 26а) входной импеданс выше, при этом согласование проще, а согласование на высоких частотах не критично. Обычно достаточно последовательных резисторов с небольшим сопротивлением, чтобы подавить инжекцию заряда в дифференциально включенную емкость. Этот простой фильтр ослабляет шумы в широкой полосе частот, обеспечивая оптимальное качество.

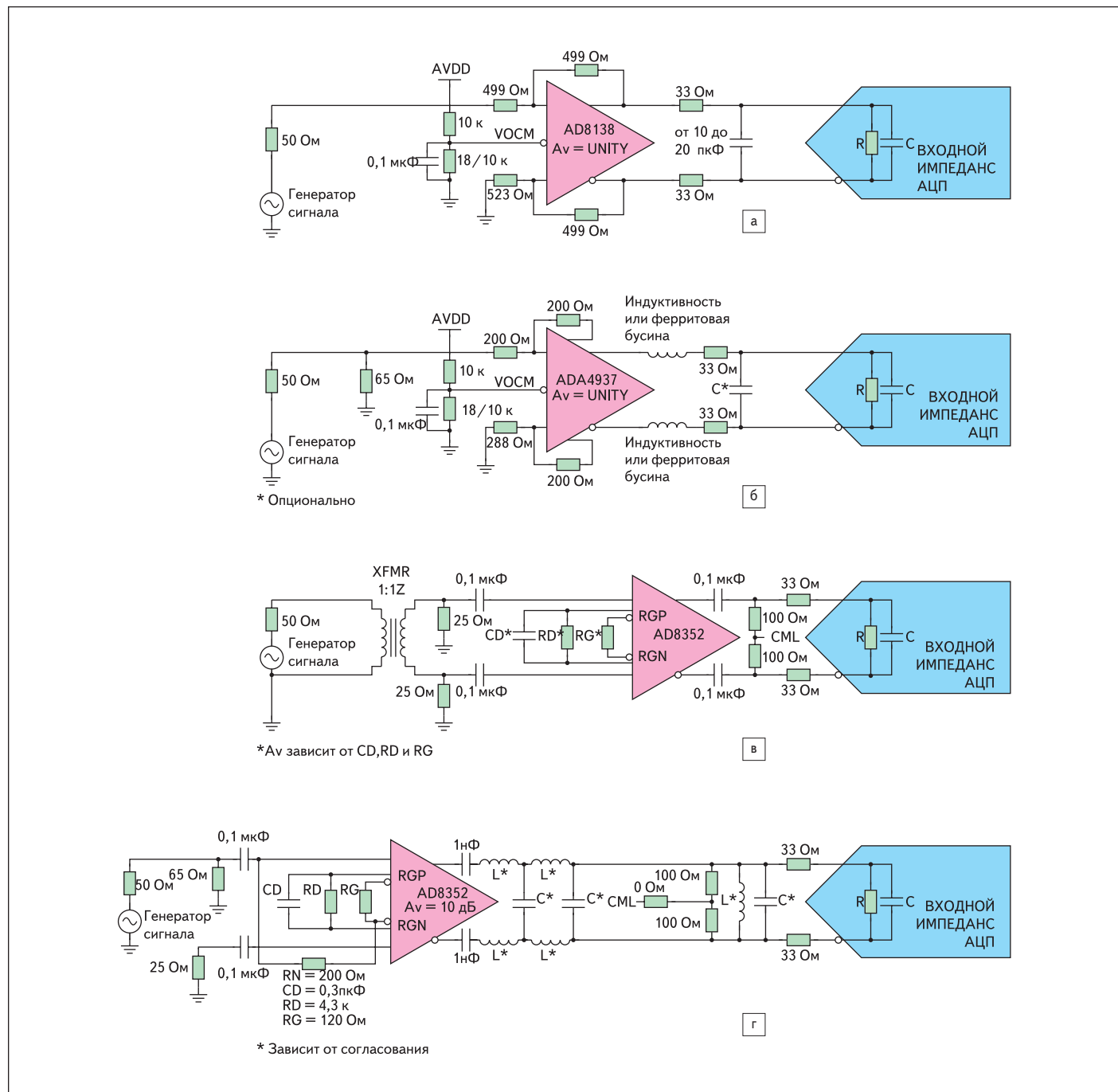


Рис. 27. Согласование входа АЦП при помощи усилителя: а) узкополосные приложения; б, в) широкополосные ПЧ; г) узкополосные резонансные приложения

Для получения хорошего согласования входов в широкополосных приложениях (рис. 26б) надо сделать доминирующей резистивную составляющую импеданса. Емкостная составляющая минимизируется при помощи индуктивностей или ферритовых бусин, подключаемых параллельно или последовательно схеме согласования. При этом достигается хорошая полоса пропускания, улучшается равномерность в полосе пропускания и обеспечивается лучшее качество (SFDR), например, при использовании АЦП на переключаемых конденсаторах семейства AD92xx.

Для применений с высокой ПЧ и буферизованными АЦП (рис. 26в) показана конфи-

гурация с двойным симметрирующим трансформатором, с фильтром, похожим на фильтр от узкополосной конфигурации. При этом достигается полоса до 300 МГц и обеспечивается хороший баланс для минимизации искажений четных гармоник.

Для узкополосных резонансных приложений (рис. 26г) топология подобна узкополосной. Однако согласование делается параллельное, а не последовательное, чтобы сузить полосу частот.

При использовании усилителя с буферизованным или не буферизованным АЦП в узкополосных приложениях разработка упрощается (рис. 27). Надо только убедиться в том,

что диапазоны синфазных напряжений усилителя и АЦП совпадают, а также использовать простой фильтр нижних частот для подавления нежелательных широкополосных шумов (рис. 27а). Для применений на ПЧ (рис. 27б, в) согласующие цепи в основном такие же, но обычно имеют более плоскую частотную характеристику. Индуктивности или ферритовые бусины могут быть при необходимости использованы на выходе усилителя для расширения полосы. Для узкополосных резонансных применений (рис. 27г) фильтр согласуется с выходным сопротивлением усилителя, чтобы не влияла входная емкость АЦП. Для подавления шумов за пределами

рабочей полосы частот обычно используются фильтры высокого порядка.

Подведение итогов.

Наиболее важные моменты

Перед началом работы над новым проектом необходимо:

- Разобраться в уровне сложности проекта.
- Выделить основные параметры проекта.
- При определении общей нагрузки на трансформатор или усилитель учесть входной импеданс АЦП и внешних компонентов.
- При выборе трансформатора:
 - Помнить, что не все трансформаторы одинаковые.
 - Понять справочные данные трансформатора.
 - Запросить у производителя недостающие параметры и модели.
 - Высокочастотные приложения чувствительны к разбалансу фазы.
 - Для подавления искажений второй гармоники могут потребоваться два трансформатора.
- При выборе усилителя:
 - Обратить внимание на шумовые параметры.
 - Понять справочные данные усилителя.
 - Для низкочастотных или узкополосных применений использовать AD8138/AD8139.
 - Для средних частот использовать ADA4937.
 - Для высокочастотных проектов использовать AD8352.
 - Усилители менее чувствительны к разбалансу и автоматически подавляют искажения четных гармоник.
 - Некоторые усилители способны сохранять постоянную составляющую входного сигнала, например, AD8138/AD8139 и ADA4937/ADA4938.
 - Усилителям свойственно изолировать источник входного сигнала от влияния нагрузки, поэтому они предпочтительнее трансформаторов при работе с чувствительными источниками сигналов.
 - Усилитель может располагаться на расстоянии от АЦП, в том числе на другой плате.

- Усилитель может потребовать отдельного источника питания и всегда увеличивает мощность, потребляемую системой.
- При выборе АЦП:
 - Выяснить, имеет ли АЦП встроенный буфер.
 - Входной импеданс АЦП со входом на переключаемых конденсаторах изменяется во времени, что усложняет применение на высоких частотах.
 - При использовании небуферизованных АЦП всегда необходимо согласование входа в режиме слежения.
 - Буферизованный АЦП удобнее для разрабатчика, особенно на высоких частотах.
 - Буферизованный АЦП обычно потребляет большую мощность.
- Наконец:
 - Для узкополосных проектов можно использовать АЦП обоих типов.
 - Используйте ферритовые бусины или низкодобротные индуктивности для согласования выхода со входной емкостью АЦП на переключаемых конденсаторах. При этом полоса пропускания будет максимальной и улучшится SFDR.
 - На высоких частотах могут понадобиться два трансформатора.

Выводы

Разбаланс фазы в трансформаторе может увеличить искажения второй гармоники, когда трансформатор используется для передачи высокочастотных сигналов (более 100 МГц, например, при аналого-цифровом или цифро-аналоговом преобразовании или усилении). Однако при использовании пар трансформаторов или симметрирующих трансформаторов можно легко получить значительное уменьшение искажений, правда, ценой добавления дополнительного трансформатора и увеличения площади печатной платы.

Приемлемого результата можно достичь и при использовании одиночного трансформатора, если полоса сигнала в проекте невелика и трансформатор выбран правильно. Однако, помимо ограничения полосы про-

пускания, этот способ может привести к увеличению стоимости и размеров устройства.

В обоих случаях выбор наилучшего трансформатора для любого заданного применения требует детального знакомства со справочными данными трансформаторов. Разбаланс фазы имеет особое значение для высокочастотных входных сигналов (более 100 МГц). Даже если этот параметр не указан в справочных данных, большинство производителей трансформаторов сообщают информацию о разбалансе фаз по специальному запросу. Для измерения разбаланса трансформатора при входном контроле или при трудностях с получением информации можно использовать анализатор схем.

Благодарности

Авторы благодарят Рави Куммаргунтла (Ravi Kummaraguntla), Энди Моргана (Andy Morgan) и Чэда Шилтона (Chad Shelton) за помощь в теоретическом анализе и проведении лабораторных экспериментов. ■

Литература

1. Reeder R. Transformer-Coupled Front End for Wideband A/D Converters // Analog Dialogue, Vol. 39, No. 2. 2005.
2. Mini-Circuits Data Sheet ADT1-1WT.
3. Pulse Data Sheet CX2039L.
4. Mini-Circuits Application Note: How Transformers Work.
5. The Mathworks Matlab program.
6. Analog Devices Data Sheet AD9445.
7. Analog Devices Data Sheet AD9238.
8. M/A-COM Data Sheet TP101.
9. Sprague-Goodman Data Sheet GLSB4R5M102.
10. AN-742, Frequency-Domain Response of Switched-Capacitor ADCs.
11. AN-827, A Resonant Approach to Interfacing Amplifiers to Switched-Capacitor ADCs.
12. Reeder R., Looney M., Hand J. Pushing the State of the Art with Multichannel A/D Converters // Analog Dialogue 39-2. 2005.
13. Kester W. Which ADC Architecture Is Right for Your Application? // Analog Dialogue. 39-2. 2005.