

# Снижение энергопотребления в системах с АЦП

Стив ЛОГАН (Steve LOGAN)  
Джон ГОССОН (John GOSSON)  
russia-feedback@maxim-ic.com

При проектировании портативного датчика, токовой петли на 4–20 мА или другой системы, содержащей аналого-цифровой преобразователь (АЦП), можно продлить время автономной работы системы регулирования или расширить ее функциональность, снизив энергопотребление. При выборе АЦП с учетом целевого уровня энергопотребления конструкции возможны разные подходы и компромиссы.

## Снижение напряжения питания

Самый очевидный подход к снижению энергопотребления — выбрать АЦП, работающий при более низком напряжении питания. Современные АЦП могут работать от источников питания аналоговой и цифровой частей напряжением 3, 2,5 или даже 1,8 В. Снизив напряжение питания с 5 В до, например, 3 В, можно сразу получить экономию энергии на 40%. Снижение напряжения питания цифровой части сопряжено с двумя недостатками (обычно не играющими значительной роли): потребность в отдельном контакте питания цифровой части на АЦП и потенциально меньший управляющий ток на цифровом выходе. Если же снижать напряжение питания аналоговой части, основной проблемой является ухудше-

ние отношения «сигнал-шум». Но благодаря современным технологическим процессам и методикам проектирования отношение «сигнал-шум» сегодняшнего низковольтного АЦП может быть не хуже, чем у менее экономичного АЦП с более высоким напряжением питания аналоговой части.

Для оптимизации энергопотребления необходимо проанализировать всю аналоговую часть конструкции, а не только ее напряжение питания. Традиционные датчики и аналоговые входные цепи требуют диапазона входных напряжений от 0 до 5 В или даже  $\pm 10$  В, если стоит задача максимально расширить динамический диапазон или если датчик подключается напрямую. Прежде снижение напряжения питания приводило к сужению динамического диапазона АЦП. Если выходной сигнал датчика оставался неизменным (5 или  $\pm 10$  В), его

приходилось ослаблять для согласования с диапазоном входных напряжений АЦП.

Простой способ реализовать такое ослабление — добавить резистивный делитель напряжения между датчиком и «землей». Для ограничения потребляемой мощности можно использовать высокоомные резисторы (рис. 1а). Однако АЦП обычно требуют низкого сопротивления источника сигнала, а это противоречит поставленной цели снижения энергопотребления.

Другой вариант (рис. 1б) состоит в том, чтобы увеличить сопротивление резистора между источником сигнала и входом АЦП, уменьшив сопротивление резистора между входом АЦП и «землей». В этом случае эффективное сопротивление источника со стороны АЦП снижается с 50 до 9,5 кОм, но ценой уменьшения диапазона входных напряжений. Например, для источника сигнала напряжением 10 В диапазон входных напряжений сужается с исходных 0–5 до 0–0,5 В.

В схемах на рис. 1а, б между резистивным делителем и входом АЦП можно добавить шунтирующий конденсатор, идущий на «землю», чтобы обеспечить развязку сопротивления источника от сопротивления, воспринимаемого со стороны входа АЦП. Такой шунтирующий конденсатор быстро переносит заряд на накопительный конденсатор на фазе выборки сигнала АЦП. К сожалению, он также ограничивает полосу пропускания входного сигнала.

В третьем варианте (рис. 1в) между резистивным делителем и АЦП включается буферный усилитель. Разумеется, на буферных и других усиливающих и фильтрующих цепях рассеивается мощность.

Если же сигнал датчика мал, снижение напряжения питания аналоговой части и сужение диапазона входных напряжений не представляет особой проблемы. Один из таких примеров — резистивный мост Уитстона, используемый в системах датчиков, типичный диапазон выходных напряжений которого составляет 2 мВ на каждый вольт напряжения

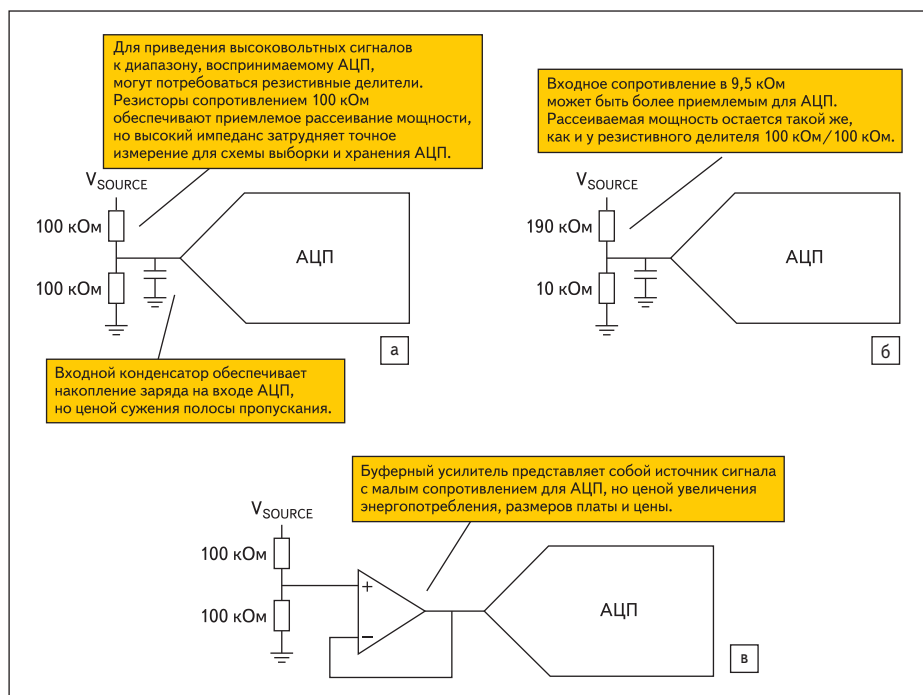


Рис. 1. Варианты схем с резистивным делителем для измерения сигналов высокого напряжения

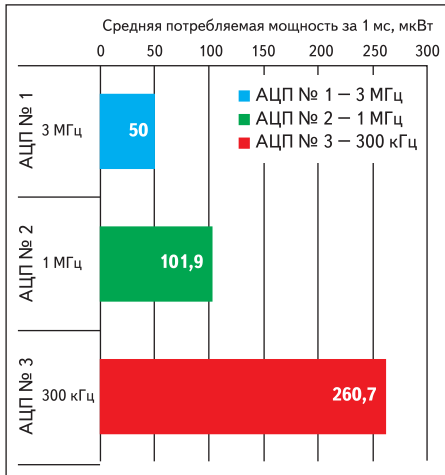


Рис. 2. Расчет средней потребляемой мощности трех АЦП с последовательной аппроксимацией для случая оцифровки 16 каналов за 1 мс

датчика. В этом случае диапазон напряжений сигнала с датчика на входе АЦП составляет всего 5–10 мВ, а сужение диапазона входных напряжений не так важно, как другие параметры — в частности, повышенное разрешение, меньший уровень собственных шумов и весьма широкий общий динамический диапазон.

## Пакетная обработка

Еще один метод проектирования экономичных схем с АЦП — реализация «пакетной обработки», при которой АЦП включается на короткое время для выполнения преобразований, а затем переводится в режим сна с низким энергопотреблением. Этот режим работы идеален для конструкций, в состав которых входят быстродействующий микроконтроллер или программируемая пользователем вентильная матрица (FPGA), а также АЦП с частотой дискретизации не ниже нескольких сотен кГц. В выключенном состоянии потребляемый АЦП ток можно снизить до нескольких микроампер или даже менее. В итоге среднее энергопотребление АЦП многократно снижается по сравнению с энергопотреблением при работе на максимальной частоте дискретизации.

Пакетная обработка использует способность АЦП включаться и выключаться с эффективной частотой, меньшей его максимальной частоты дискретизации. В паспорте почти каждого АЦП указывается рассеиваемая мощность при максимальной частоте дискретизации (называемой также пропускной способностью). На рис. 2 три аналогичных АЦП со встроенными мультиплексорами оцифровывают сигналы с 16 аналоговых входов за период в 1 мс с эффективной частотой дискретизации 1 кГц в каждом случае. При максимальной частоте дискретизации АЦП № 1 рассеивает мощность 8,3 мВт (3 МГц), АЦП № 2 — 6 мВт (1 МГц), а АЦП № 3 — 4,7 мВт (300 кГц). Если пробежать

взглядом только первые страницы спецификаций, возникнет впечатление, что наилучшим выбором по рассеиваемой мощности будет АЦП с максимальной частотой дискретизации 3 МГц. Но если проанализировать такие параметры, как активная мощность, мощность в выключенном состоянии (режиме ожидания) и эффективная частота дискретизации, становится очевидным, что в действительности более быстродействующий АЦП является лучшим вариантом.

Для АЦП № 1 рабочая мощность 8,3 мВт потребляется всего 5,3 мкс (333 нс на преобразование × 16 преобразований), а на протяжении оставшейся части 1-миллисекундного рабочего цикла (994,7 мкс) потребляется мощность режима ожидания, равная 6 мкВт. Поскольку

$$\begin{aligned} \text{Средняя мощность} = & \\ & [( \text{рабочая мощность} \times \\ & \times \text{длительность рабочего режима} ) + \\ & + ( \text{мощность в режиме ожидания} \times \\ & \times \text{длительность режима ожидания} ) ] / \\ & / \text{длительность цикла}, \end{aligned}$$

получаем, что эффективная пропускная способность составляет 1 кГц, а средняя потребляемая мощность — 50 мкВт.

АЦП № 2 аналогичен АЦП № 1, но имеет максимальную частоту дискретизации 1 МГц. Рабочая мощность равна 6 мВт и потребляется в течение 16 мкс (1 мкс на преобразование), а мощность в выключенном состоянии равна 6 мкВт и потребляется в течение 984 мкс. Таким образом, средняя потребляемая мощность у этого АЦП более чем в 2 раза выше, чем у АЦП № 1.

АЦП № 3 построен на базе менее быстродействующего ядра и имеет максимальную частоту дискретизации 300 кГц. Рассеиваемая мощность составляет всего 4,65 мВт, но преобразование 16 отсчетов занимает теперь 53 мкс (в десять раз дольше, чем у АЦП № 1), а мощность в выключенном состоянии равна 15 мкВт и потребляется в течение 947 мкс. В итоге средняя потребляемая мощность АЦП № 3 составляет 260,7 мкВт, что более чем в пять раз превышает соответствующий показатель АЦП № 1.

Один из недостатков пакетной обработки — потенциальная необходимость в микроконтроллере или FPGA с более высокой тактовой частотой. Другой недостаток — необходимость включать и выключать источник опорного напряжения. Если АЦП оборудован встроенным источником опорного напряжения, ему понадобится некоторое время (часто более 100 мкс) на включение и установление напряжения. Только по истечении этого времени АЦП будет способен обеспечить заявленную линейность.

В конструкциях, работающих в пакетном режиме с внешним по отношению к АЦП источником опорного напряжения, последний можно держать постоянно включенным. Это

должен быть источник с очень низким энергопотреблением — например, последовательный источник MAX6029, потребляющий не более 5,25 мкА во всем диапазоне рабочих температур. Он имеет ряд фиксированных выходных напряжений: 2,048, 2,5, 3, 3,3, 4,096 и 5 В. Этот набор опорных напряжений подходит практически для любого АЦП. Например, версия на напряжение 2,048 В дополнительно потребляет в среднем всего 15,75 мкВт.

## Использование имеющегося АЦП при более низкой частоте дискретизации

В паспортах большинства АЦП приводится потребляемый ток при двух условиях: при максимальной частоте дискретизации и в выключенном состоянии. Знать эти две опорные точки важно, но во многих системах АЦП работает на частоте дискретизации ниже максимальной. В этом случае полезно исследовать, как меняется потребляемый ток в зависимости от частоты дискретизации. В качестве примера на рис. 3 показана зависимость потребляемого тока от частоты дискретизации для АЦП на 300 кГц (с рис. 2), питающегося от источника напряжением 3 В. Рассеиваемая мощность составляет 3 В × 0,62 мА = 1,86 мВт на частоте 300 кГц, но всего 1,26 мВт на частоте 100 кГц, что дает 32%-ную экономию.

Путем включения на время преобразования и выключения на оставшееся время можно добиться существенного снижения энергопотребления АЦП с последовательной аппроксимацией при более низких частотах дискретизации. Аналогичные профили рассеяния мощности можно наблюдать у большинства АЦП с последовательной аппроксимацией, но экономия энергии может быть менее значительной, если какие-то внутренние цепи остаются включенными в промежутке между преобразованиями. В любом случае имеет смысл взглянуть на кривую зависимости

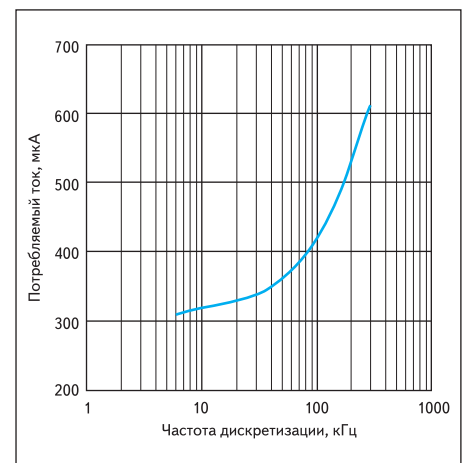


Рис. 3. Зависимость потребляемого тока от частоты дискретизации для АЦП с последовательной аппроксимацией

типичного значения потребляемого тока от частоты дискретизации (рис. 3) в паспорте АЦП с последовательной аппроксимацией.

### АЦП с последовательной аппроксимацией и $\Sigma\Delta$ -АЦП

Уменьшение потребляемого тока со снижением частоты дискретизации является отличием АЦП с последовательной аппроксимацией. Другие типы АЦП, используемые в прецизионных схемах, —  $\Sigma\Delta$ -АЦП — обычно не дают экономии энергии при меньшей частоте дискретизации, поскольку  $\Sigma\Delta$ -модулятор обеспечивает высокую точность за счет избыточной дискретизации входного сигнала и усреднения результата. С другой стороны, цепь дискретизации АЦП с последовательной аппроксимацией работает не непрерывно: на каждый отсчет берется один «снимок» аналогового входного сигнала.

Работа  $\Sigma\Delta$ -АЦП при пониженной частоте дискретизации не дает экономии энергии, но снижает средний уровень шума, а следовательно, обеспечивает более высокое эффективное разрешение. Например, 24-разрядный  $\Sigma\Delta$ -АЦП MAX11200 имеет низкую потребляемую мощность (не более 1 мВт) и чрезвычайно высокое эффективное разрешение (23 разряда и выше). Он позволяет получать большее эффективное разрешение при более низких частотах дискретизации, варьируя частоту дискретизации и коэффициент избыточной дискретизации. При частоте внутреннего тактового генератора 2,4576 или 2,048 МГц он обеспечивает эффективное разрешение 21,7 разряда на частоте дискретизации 120 Гц и 23,6 разряда на частоте дискретизации 10 Гц. В таблице 1 приведены значения частоты дискретизации, доступные в этом АЦП через программное управление, а также результирующее бесшумное разрешение (NFR), эффективное разрешение и среднеквадратичный уровень шума.

### Расширение динамического диапазона при устранении усилительного каскада

Выбирая, какой тип преобразователя использовать (АЦП с последовательной аппроксимацией или  $\Sigma\Delta$ -АЦП), полезно рассмотреть рассеяние мощности во всем сигнальном тракте. Тракт может содержать усилитель с программируемым коэффициентом усиления, так как многие АЦП с последовательной аппроксимацией усиливают или ослабляют входной сигнал по необходимости, чтобы он занимал существенную часть максимального диапазона входных напряжений АЦП. Такой усилитель может быть встроенным или внешним.

Например, конструкция, измеряющая сигнал напряжением 20 мВ, который поступает с датчика на базе моста Уитстона, может содержать каскад с коэффициентом усиления 100 между мостом и АЦП. (Часто диапазон входных напряжений АЦП составляет 0–3 или 0–5 В.) В случае 12-разрядного АЦП со смещением 3 В, поступающим с источника опорного напряжения, младшему разряду соответствует напряжение 0,73 мВ. Без усиления АЦП разрешал бы только 27 единиц младшего разряда в сигнале напряжением 20 мВ (20 мВ/0,73 мВ). После добавления усилительного каскада с коэффициентом усиления 100 АЦП в том же сигнале разрешает 2740 единиц младшего разряда.

Стоимость быстродействующих  $\Sigma\Delta$ -АЦП высокого разрешения за последние годы снизилась в достаточной степени, чтобы они стали доступной альтернативой сочетанию АЦП с последовательной аппроксимацией и усилителя с программируемым коэффициентом усиления. Малый уровень шума и обусловленное этим высокое эффективное разрешение  $\Sigma\Delta$ -АЦП позволяют полностью избавиться от усилителя и соответствующего рассеяния мощности. Многие  $\Sigma\Delta$ -АЦП можно подключать к датчику напрямую, при этом они обеспечивают то же разрешение по входному сигналу, что и АЦП с последовательной аппроксимацией плюс программируемый усилитель. Это стало возможным благодаря малому уровню шума  $\Sigma\Delta$ -АЦП (менее 1 мкВ). В контексте эффективного разрешения, которое определяется диапазоном входных напряжений и уровнем собственных шумов АЦП, шум АЦП регистрируется, по сути, на постоянном токе, для которого шум квантования не является проблемой:

Таблица 1. Характеристики АЦП MAX11200 при разных частотах дискретизации

Значение регистра (частота [2:0])	Частота дискретизации за один период, Гц		Биполярное разрешение без шума	Биполярное эффективное разрешение	Уровень выходного шума, мкВ <sub>ср.кв.</sub>
	LINEF = 0	LINEF = 1			
000	1	0,83	22,3	24	0,21
001	2,5	2,08	22	24	0,27
010	5	4,17	21,4	24	0,39
011	10	8,33	20,9	23,6	0,57
100	15	12,5	20,5	23,2	0,74
101	30	25	20,0	22,7	1,03
110	60	50	19,5	22,2	1,45
111	120	100	19	21,7	2,21

$$\begin{aligned} \text{Эффективное разрешение} &= \\ &= \log_2(\text{диапазон входных напряжений} / \text{шумовое напряжение}) = \\ &= \log_2(20 \text{ мВ} / 210 \text{ мВ}) = 16,5 \text{ разряда}. \end{aligned}$$

На том же сигнале с моста напряжением 20 мВ с помощью упомянутого выше АЦП (со среднеквадратичным шумовым напряжением 210 нВ) можно достичь эффективного разрешения 16,5 разряда. Вычислив эффективное разрешение, конструктор может определить результирующее бесшумное разрешение (эффективное разрешение минус 2,7 разряда) и соответствующее число бесшумных отсчетов. Число бесшумных отсчетов определяется как число не искаженных шумом отсчетов, которое может взять АЦП. Например, АЦП с бесшумным разрешением 12 разрядов (идеальный 12-разрядный АЦП) способен взять 4096 бесшумных отсчетов. Определим число бесшумных отсчетов в приведенном выше примере:

$$\text{Число бесшумных отсчетов} = 2^{NFR} = 2^{(16,5-2,7)} = 2^{13,8} = 14\,263 \text{ EPR}.$$

Таким образом, малошумящий  $\Sigma\Delta$ -АЦП обеспечивает более высокое эффективное разрешение, более высокое бесшумное разрешение и большее число бесшумных отсчетов, чем сочетание АЦП с последовательной аппроксимацией и усилителя с программируемым коэффициентом усиления. В таблице 2 сравниваются характеристики идеального 12-разрядного АЦП с программируемым усилителем и малошумящего  $\Sigma\Delta$ -АЦП. Можно видеть, что  $\Sigma\Delta$ -АЦП не только обеспечивает большее число бесшумных отсчетов и более высокое разрешение, но и потребляет при этом меньше энергии. Главное, чем обычно приходится жертвовать, — это максимальная частота дискретизации  $\Sigma\Delta$ -АЦП. Подробнее о  $\Sigma\Delta$ -АЦП написано в разделе «Проектирование экономичных  $\Sigma\Delta$ -АЦП».

Подводя итоги, можно сказать, что необходимость в снижении энергопотребления по-прежнему является важным фактором развития в большинстве систем. Сейчас в распоряжении проектировщиков схем с АЦП имеется множество методов снижения общего энергопотребления системы: различные архитектуры АЦП, пакетная обработка, работа АЦП с последовательной аппроксимацией при по-

Таблица 2. Сравнение характеристик комбинации «АЦП с последовательной аппроксимацией + усилитель с программируемым КУ» и  $\Sigma\Delta$ -АЦП

Параметр	12-разрядный АЦП с посл. аппр. + усилитель с программируемым КУ	20-разрядный $\Sigma\Delta$ -АЦП
Напряжение источника	20 мВ	20 мВ
Усилительный каскад	100×	—
Входное напряжение АЦП	2 В	20 мВ
Опорное напряжение	3 В	3 В
Размер младшего разряда АЦП	0,73 мВ	2,86 мкВ
Эффективное разрешение <sup>1</sup> , разрядов	12	16,5
Бесшумное разрешение <sup>1</sup> , разрядов	12	13,8
Число бесшумных отсчетов	2740	14 263
Скорость вывода данных	Выше	Ниже
Энергопотребление	Выше	Ниже
Цена	Сравнимая	Сравнимая

Примечание. <sup>1</sup> В предположении идеального 12-разрядного АЦП.

нижней частоте дискретизации и снижении напряжения питания. Хотя эти методы вынуждают идти на различного рода компромиссы, они могут обеспечить более длительную автономную работу или, например, возможность использования более быстродействующего АЦП в рамках бюджета мощности токовой петли на 4–20 мА.

### Проектирование экономичных $\Sigma\Delta$ -АЦП

Сильная сторона архитектуры «сигма-дельта» является одновременно и одним из самых крупных ее недостатков. Сигма-дельта АЦП содержат большое количество цифровых цепей: во многих случаях такие цепи занимают более половины общей площади кристалла. Кристалл может быть усовершенствован за счет основного преимущества — размеров, которое обеспечивается субмикронной КМОП-технологией, но только если останутся доступными соответствующие аналоговые структуры.

При разработке передовых  $\Sigma\Delta$ -АЦП важнейшую роль в оптимизации цифровых цепей (площадь кристалла и энергопотребление) и аналоговых цепей (отношение «сигнал-шум» и линейность) играет выбор технологического процесса. Снижение напряжений и емкостей затвора влечет падение производительности цифровой части, а возможности масштабирования аналоговой части ограничены характером измеряемых сигналов. Такие технологии, как металл-изолятор-металл (МИМ) и полимерно-полимерные емкостные структуры, с великолепной линейностью позволяют изготавливать цепи выборки с достаточно малым шумом и высокой точностью воспроизведения сигнала для запоминания аналоговой информации. Структуры с глубокими карманами  $n$ -типа обеспечивают достаточную степень развязки аналоговых цепей от фонового шума подложки, а также возможность реализации столь необходимых вертикальных  $n$ - $p$ -транзисторов для усилителей и источников опорного напряжения.

Выбор архитектуры также играет роль в разработке экономичных конструкций. Различные структуры модуляторов, на которых основан принцип работы  $\Sigma\Delta$ -АЦП, позволяют обходиться меньшей амплитудой выходного напряжения в интегрирующих каскадах. В свою очередь усилитель, являющийся сердцем интегратора, может быть компактнее, а следовательно, и потреблять меньший ток. Два наиболее популярных подхода к проектировке экономичных схем — это топологии с прямой связью и многоразрядная обратная связь.

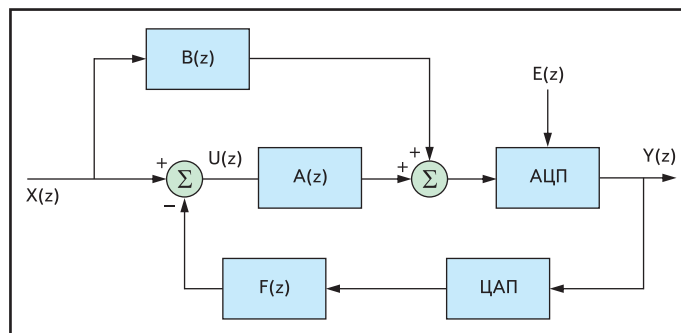


Рис. 4. Пример модулятора с прямой связью для  $\Sigma\Delta$ -АЦП

Топологии с прямой связью могут ограничить или даже вовсе устранить зависимость от входного сигнала в интегрирующих каскадах. На обобщенной схеме реализации топологии с прямой связью (рис. 4) часть выходных данных, зависящую от сигнала, можно устранить, выбрав  $B(z)$  равным  $1/F(z)$ . Если эти величины выбраны так, что  $B(z) = F(z) = 1$ , мы имеем дело с классической топологией прямой связи.

Развязка амплитуды выходного напряжения интегратора от входного сигнала позволяет системе обрабатывать более мощные входные сигналы без ограничения, а большая амплитуда сигнала на входе уменьшает требуемую мощность, позволяя иметь более высокий уровень собственных шумов при заданном отношении «сигнал-шум». Если система обрабатывает только ошибку квантования (особенно при многоразрядной обратной связи), она будет работоспособна при меньшей линейности интегратора и меньшем значении произведения коэффициента усиления на полосу пропускания в усилителе. Многоразрядная обратная связь еще более усиливает этот эффект, уменьшая разность напряжений между соседними шагами квантования. В результате опять-таки снижается требуемая мощность, и при этом не возникает необходимости работать в области, которая ограничена скоростью нарастания напряжения.

Для получения дополнительной информации обращайтесь к официальным дистрибьюторам Maxim в РФ — <http://russia.maxim-ic.com/sales>.