

Рекомендации по применению высокопроизводительных многоканальных АЦП с одновременной выборкой в системах сбора данных

Джозеф ШТАРГОТ
(Joseph SHTARGOT)

Данная статья предназначена для разработчиков высококачественных многоканальных систем сбора и обработки данных с одновременной выборкой. Материал поможет правильно выбрать компоненты и расположить их на печатной плате так, чтобы добиться оптимальных параметров системы. Представлены АЦП с одновременной выборкой — MAX1308, MAX1320 и MAX11046. Преимущества предлагаемого подхода доказывают результаты измерений.

Введение

В настоящее время многочисленные системы промышленного применения требуют использования многоканальных АЦП с одновременной выборкой. Рассмотрим такие системы на примере усовершенствованной системы контроля цепей питания (рис. 1) или ультрасовременной системы управления

трехфазными двигателями (рис. 2). Для таких систем необходимы прецизионные многоканальные АЦП с одновременной выборкой, работающие в зависимости от конкретного применения в широком динамическом диапазоне от 70 до 90 дБ. При этом типичной является частота выборки от 16 кГц и выше.

В состав микросхем MAX1308, MAX1320 и MAX11046 входят 8 независимых входных

каналов с одновременной выборкой и быстрый АЦП последовательного приближения. Чтобы обеспечить высокие параметры измерительной системы, разработчику нужно обратить особое внимание на архитектуру системы, используемые компоненты и разводку печатной платы.

Контроль каждой фазы осуществляется трансформатором тока и трансформатором напряжения. Законченная система состоит из четырех таких блоков (3 блока для контроля фаз и один — для контроля нейтрали).

После одновременной выборки всех контролируемых сигналов и аналогово-цифрового преобразования блок цифровой обработки позволяет рассчитать мгновенное и среднее значения активной, реактивной и полной мощности, а также значение коэффициента мощности.

Все АЦП, изображенные на рис. 2, осуществляют одновременную выборку измеряемых сигналов. Таким образом, от блока цифровой обработки сигналов не требуется экстраполяции измеряемых сигналов и приведения их к одному моменту времени.

Основные источники шумов и интерференционных помех в промышленных системах сбора данных

В системах сбора данных можно выделить 2 типа шумовых и интерференционных помех. Первый тип обусловлен внутренними шумами, присущими электронным компонентам. Источником таких помех могут служить шумы и гармонические искажения процесса аналогово-цифрового преобразования,

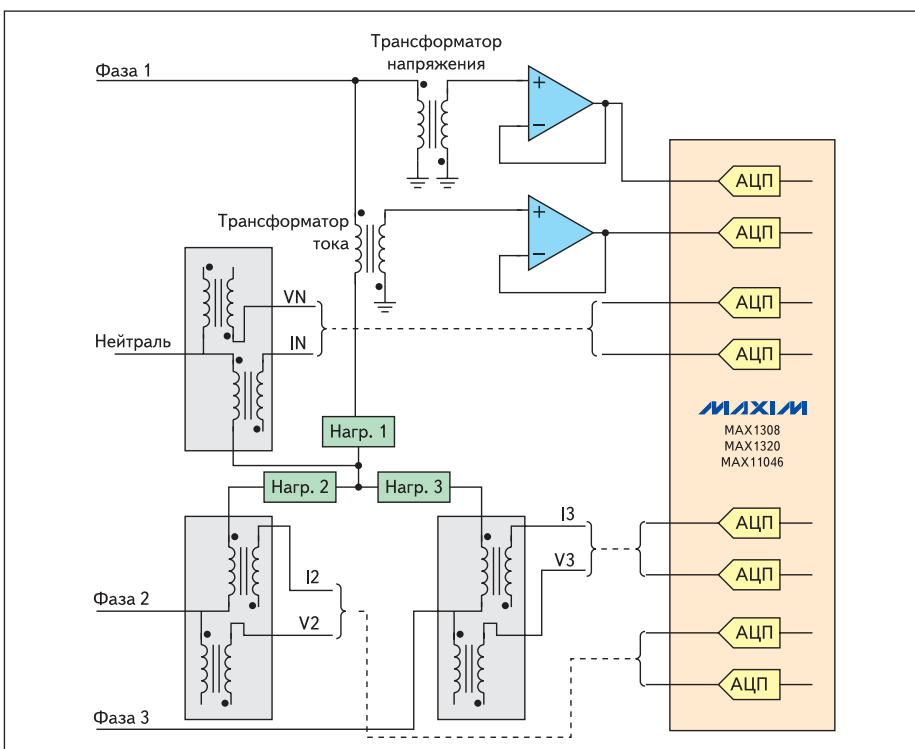


Рис. 1. Схема контроля трехфазной цепи питания

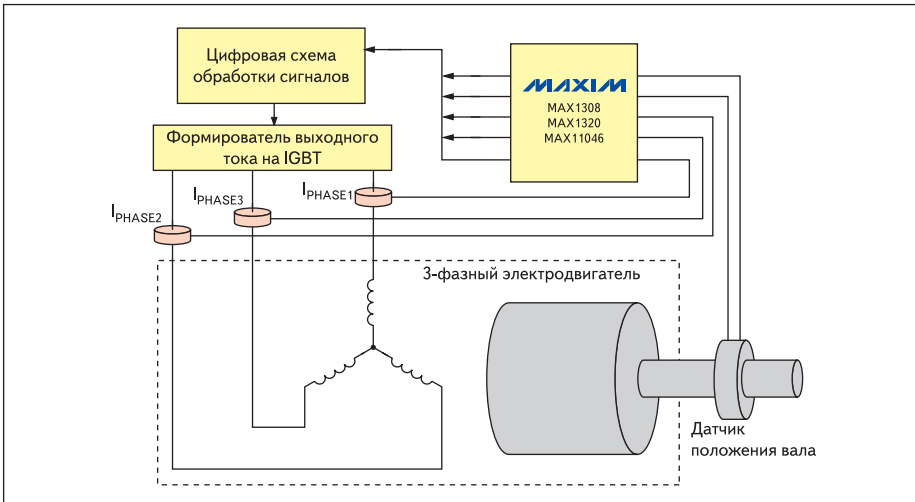


Рис. 2. Типовая схема управления трехфазным электродвигателем

Суммарный уровень шума и пульсаций входного сигнала не должен превышать 1/2 МЗР. В то же время шумы квантования определяют собственный уровень шума измерительной системы.

Примечание. В некоторых конструкциях уровень шума всего в 1 мВ среднеквадратичного значения может значительно ухудшить параметры измерительной схемы (табл. 2).

Таблица 2. Пример ухудшения параметров системы при недостаточном снижении уровня шума

АЦП	Число каналов	Число разрядов	Число «потерянных» битов при уровне шума 1 мВ	Эффективное число разрядов
MAX1308	8	12	0,71	11,3
MAX1320	8	14	2,71	11,3
MAX11046	8	16	4,00	12,0

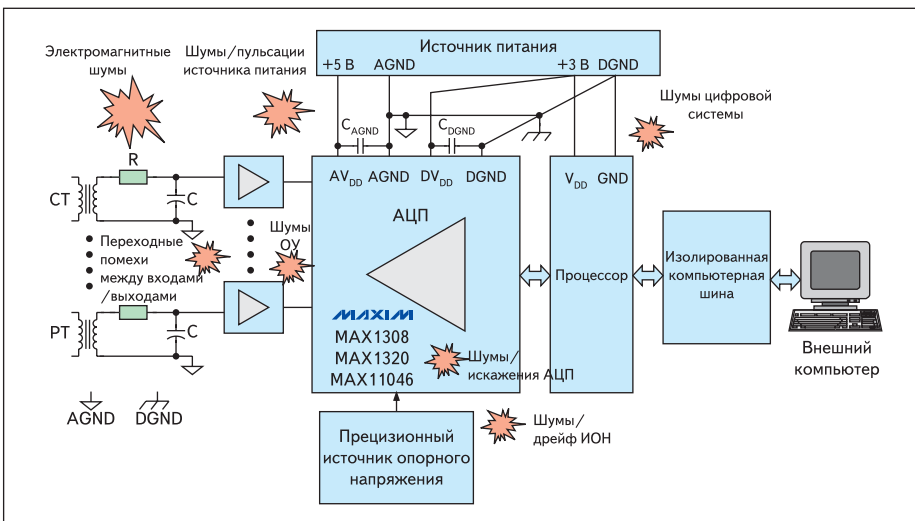


Рис. 3. Блок-схема типовой системы контроля сети электропитания (на схеме показаны различные источники шумов и помех, влияющие на точность и разрешение измерительной схемы)

Правильный выбор входного буферного усилителя

Как показано на рис. 4, входные цепи микросхем семейств MAX130x и MAX132x обладают сравнительно низким импедансом. Следовательно, в большинстве случаев эти микросхемы требуют применения входных буферных усилителей для достижения 12- и 14-битной точности.

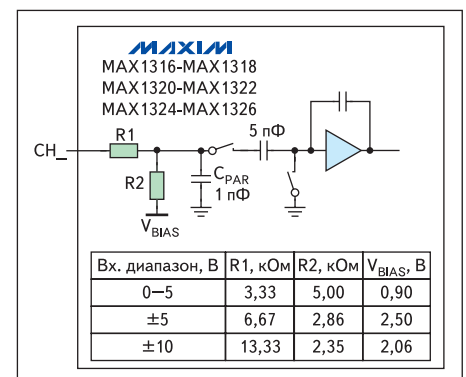


Рис. 4. Упрощенная схема входных цепей в АЦП семейств MAX130x и MAX132x

шумы и искажения буферного операционного усилителя, шумы и нестабильность источника опорного напряжения.

Второй тип шумов обусловлен взаимодействием системы с внешними источниками помех. В качестве примера можно привести электромагнитные наводки, пульсации или шумы источников питания, переходные помехи между входами/выходами и шумы или помехи от цифровых схем.

Эти различные источники шумов представлены на рис. 3.

Система сбора и обработки данных в цепи электропитания состоит из измерительных трансформаторов тока и напряжения, набора низкочастотных фильтров, буферных усилителей, АЦП с одновременной выборкой и процессора цифровой обработки сигналов.

«Сердцем» системы является АЦП с одновременной выборкой. Он измеряет напряжения и токи, приведенные к стандартному промышленному диапазону измерений +5, ±5 или ±10 В. Каждая из микросхем MAX130x,

MAX132x и MAX1104x содержит необходимые цепи, предназначенные для поддержки необходимых входных диапазонов без использования дополнительных цепей формирования сигналов.

Значения напряжения, соответствующего одному младшему значащему разряду (МЗР), и шумы квантования этих семейств АЦП приведены в таблице 1. Эти значения показывают разработчикам, какого уровня шумов и помех в измерительной системе необходимо достичь при различном числе разрядов АЦП.

Таблица 1. Шаг и шумы квантования в зависимости от числа разрядов АЦП

АЦП	Число каналов	Число разрядов	Опорное напряжение, В	МЗР, мВ	Шум квантования, мВ	Отношение С/Ш, дБ
MAX1308	8	12	2,5	0,6104	0,1762	71
MAX1320	8	14	2,5	0,1526	0,0440	76
MAX11046	8	16	4,096	0,0625	0,0180	85

Основными требованиями при выборе буферного усилителя для точности измерения от 12 до 16 бит являются: достаточная полоса пропускания, скорость нарастания выходного напряжения, размах выходного напряжения, малый уровень шума, малые искажения и незначительное напряжение смещения. Уровень шума усилителя должен быть как можно ниже, значительно ниже, чем требуемый для достижения необходимой точности.

Параметры некоторых операционных усилителей, рекомендованных для применения, приведены в таблице 3. В противоположность этому в таблице 4 приведены параметры некоторых популярных операционных усилителей, не рекомендуемых для использования с прецизионными АЦП.

Таблица 3. Прецизионные операционные усилители, рекомендованные для применения с АЦП различного разрешения

Тип	Напряжение питания, В	Частота единичного усиления, МГц	Скорость нарастания, В/мкс	Размах выходного напряжения	Напряжение смещения, мВ	Спектральная плотность шума	Комментарии
MAX410–MAX412	±5	28	4,5	7,2	0,25	2,4	для точности от 12 бит до 16 бит
MAX4250	+5	3	0,3	5	0,75	7,9	для точности от 12 бит до 14 бит

Таблица 4. Популярны операционные усилители, не рекомендуемые для использования с прецизионными АЦП

Тип	Напряжение питания, В	Частота единичного усиления, МГц	Скорость нарастания, В/мкс	Размах выходного напряжения	Напряжение смещения, мВ	Спектральная плотность шума	Комментарии
LF411	±15	4	15	20	2,0	25	для точности до 12 бит
LM124	±15	1,2	0,5	20	3,0	35	для точности до 11 бит

Альтернативные требования к входному фильтру: семейство MAX11046

В микросхемах семейства MAX11046 используется другая архитектура входных цепей, не требующая использования входного буферного усилителя (рис. 5). Эффективный входной импеданс Z_{IN} микросхемы MAX11046 определяется входной емкостью и частотой выборки:

$$Z_{IN} = 1/(C_{IN} \times F_{SAMPLE}),$$

где F_{SAMPLE} — частота выборки, а $C_{IN} = 15$ пФ.

При снижении частоты выборки входной импеданс увеличивается и составляет:

- 266 кОм на частоте 250 000 выборок/с;
- 2,66 МОм на частоте 25 000 выборок/с.

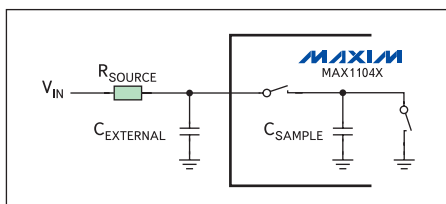


Рис. 5. Упрощенная схема входных цепей микросхем семейства MAX11046

Очень высокое значение входного импеданса микросхем семейства MAX11046 позволяет подключать их напрямую к низкоомным датчикам. Например, трансформаторы тока и напряжения являются сравнительно низкоомными датчиками (сопротивление порядка 10–50 Ом) и, следовательно, могут быть подключены непосредственно к входам MAX11046 с использованием простых НЧ-фильтров.

В таблице 5 приведены значения R_{SOURCE} и $C_{EXTERNAL}$ для типичных низкочастотных применений, типа схемы контроля цепей питания или схемы управления трехфазными электродвигателями.

Таблица 5. Значения R_{SOURCE} и $C_{EXTERNAL}$ для различных частот выборки

F_{SAMPLE} (выборки/с)	$C_{EXTERNAL}$ (пФ)				
	0	100	300	1000	3000
	R_{SOURCE} (Ом)				
1000	$1,0 \times 10^6$	$3,3 \times 10^5$	$1,4 \times 10^5$	$4,7 \times 10^4$	$1,6 \times 10^4$
2500	$4,0 \times 10^5$	$1,3 \times 10^5$	$5,7 \times 10^4$	$1,9 \times 10^4$	$6,5 \times 10^3$
5000	$2,0 \times 10^5$	$6,6 \times 10^4$	$2,8 \times 10^4$	$9,4 \times 10^3$	$3,2 \times 10^3$
10 000	$9,7 \times 10^4$	$3,2 \times 10^4$	$1,4 \times 10^4$	$4,6 \times 10^3$	$1,6 \times 10^3$
25 000	$3,7 \times 10^4$	$1,2 \times 10^4$	$5,3 \times 10^3$	$1,8 \times 10^3$	$6,1 \times 10^2$

Правильный выбор значений R_{SOURCE} и $C_{EXTERNAL}$ важен для достижения необходимой точности АЦП.

Резистор R_{SOURCE} должен быть металлическим пленочным с разбросом 1% (или лучше) и низким температурным коэффициентом сопротивления. Желательно выбирать компоненты достойных уважения производителей, таких как Panasonic, ROHM или Vishay.

Для достижения наилучших результатов конденсатор $C_{EXTERNAL}$ должен быть керамическим с рекомендуемым типом диэлектрика NPO. Такие конденсаторы сохраняют свою емкость в широком диапазоне температур и напряжений. Компании Kemet, AVX или Samsung предлагают большой выбор недорогих компонентов для поверхностного монтажа.

Требования к источнику опорного напряжения АЦП

Источник опорного напряжения является критическим компонентом, оказывающим значительное влияние на параметры схемы сбора данных, и сильно влияет на разрешение и точность (табл. 1). Особенно важен температурный дрейф и начальная точность опорного напряжения.

Рассмотрим для примера АЦП MAX11046 с $1 \text{ МЗР} = 62,5 \text{ мкВ}$. Температурный дрейф встроенного источника опорного напряжения достигает $\pm 10 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. При диапазоне температур, равном 50°C , дрейф напряжения смещения может достигать $\pm 500 \text{ ppm}$, что эквивалентно $\pm 2,048 \text{ мВ}$ ($\pm 33 \text{ МЗР}$).

В тех случаях, когда важен температурный дрейф, необходимо использовать внешний источник опорного напряжения с малым температурным дрейфом, такой как MAX6341 ($1 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$). При использовании такого источника суммарный дрейф не будет превышать $0,2 \text{ мВ}$ в диапазоне температур 50°C (или всего 3 МЗР). Опорное напряжение MAX6341 имеет начальную точность $4,096 \pm 0,001 \text{ В}$, что значительно лучше встроенного источника опорного напряжения MAX11046 $4,096 \pm 0,0016 \text{ В}$. Таким образом, при использовании прецизионного внешнего источника опорного на-

пряжения достигается значительно более высокая точность и температурная стабильность измерений.

Входной ток для подключения внешнего источника опорного напряжения MAX11046 не превышает $\pm 10 \text{ мкА}$. Поэтому источник опорного напряжения типа MAX6341 с выходным током до 10 mA можно использовать для подключения одновременно к нескольким прецизионным АЦП, что снижает разброс параметров отдельных АЦП.

Требования к конструкции и разводке печатной платы

В дальнейшем конструкция многоканального АЦП с одновременной выборкой будет рассматриваться на примере системы контроля многофазных цепей питания. Будут проанализированы конструктивные пути снижения влияния отдельных источников шумов и помех, приведенных на блок-схеме устройства на рис. 3.

Подавление шумов за счет использования низкочастотных фильтров

Уровень шумов и помех в цепях питания может достигать значительной величины. Обычно эти шумы возникают в электрических кабелях и распределительных устройствах за счет индуктивной или емкостной связи с внешними источниками помех. Шумы и помехи обусловлены также динамическим характером цепей питания.

Возвращаясь к рис. 3, скажем, что рабочая частота трансформаторов напряжения и тока составляет 50 или 60 Гц. Реальный трансформатор имеет значительно более широкую полосу пропускания (порядка 100 кГц) и может оказывать фильтрующее влияние только на частотах выше 100 кГц.

Другой значительный источник шумов и помех представляют собой некоторые электронные компоненты, расположенные на печатной плате измерительного устройства. Обычно такими источниками являются процессоры и цепи источника питания. Это особенно актуально при использовании импульсных источников питания. Поэтому на входе каждого канала АЦП необходимо использовать помехоподавляющие низкочастотные фильтры. Компоненты фильтра должны монтироваться как можно ближе к входам АЦП. В таблице 5 приведены рекомендованные значения номиналов элементов фильтров при использовании совместно с MAX11046.

Практический пример реализации этого подхода представлен на рис. 6. Схема является частью оценочного комплекта для микросхемы MAX11046. Входные цепи каналов второго по седьмой демонстрируют пример прямого подключения, когда внешний сигнал подается на вход АЦП без использования буферного усилителя. Оптимальные значения резисторов и конденсаторов при частоте

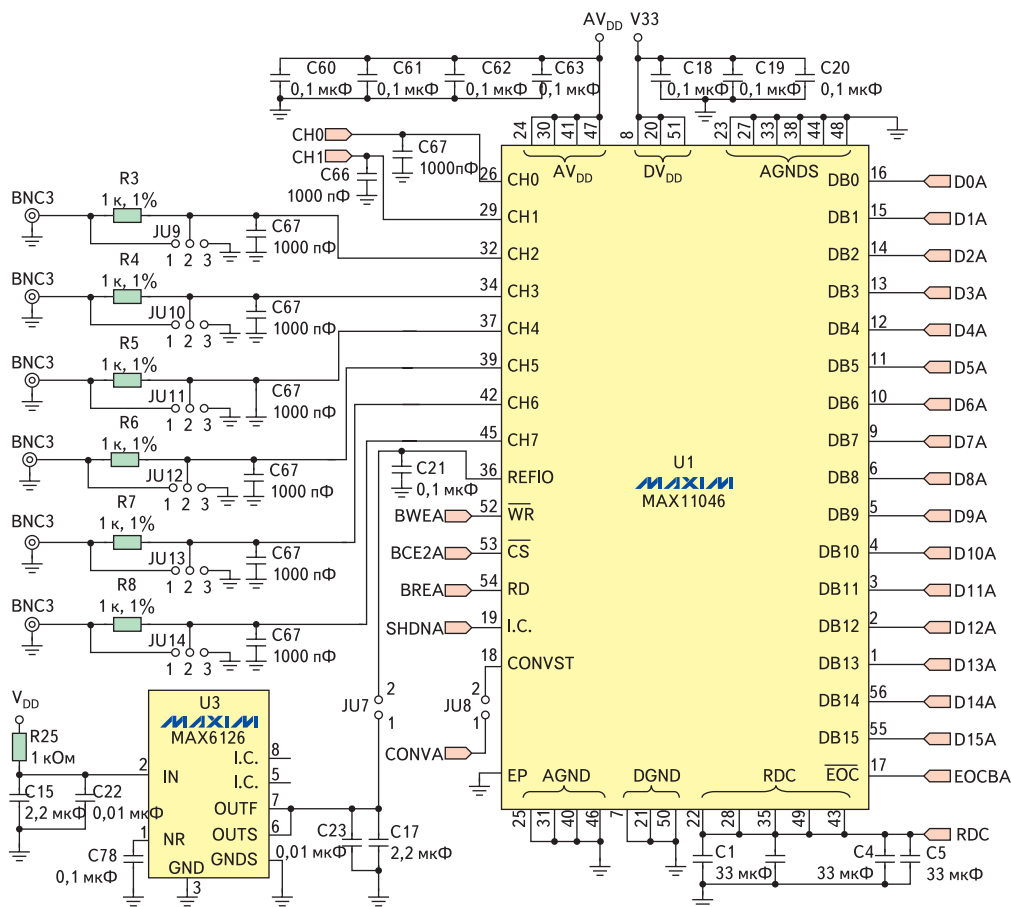


Рис. 6. Типовая схема подключения MAX11046

те 10 000 выборок/с приведены в таблице 5. Значение $R = 4,6 \text{ кОм}$ и $C = 1000 \text{ пФ}$ являются типичными для схем контроля цепей питания. Канал 0 и канал 1 могут быть сконфигурированы для работы с буферным усилителем, необходимым при работе на частотах более 100 000 выборок/с.

Сам оценочный комплект позволяет значительно ускорить разработку системы сбора данных.

Заземление и экранирование сигнальных цепей

Входные дорожки печатной платы, пропускающие аналоговые сигналы от входных разъемов до входов АЦП, подвержены влиянию внешних помех, шумов и переходных помех между отдельными каналами АЦП.

Для достижения безошибочности входного сигнала должны приниматься специальные меры по заземлению и экранированию аналоговых входных дорожек. На рис. 7 приведен пример фрагмента печатной платы, предназначенный для защиты аналоговых сигналов.

Напомним, что MAX11046 обладает очень высокой степенью изоляции между каналами. Чтобы сохранить высокое значение этого параметра, требуется использование копланар-

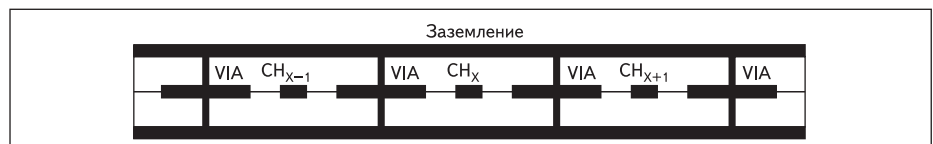


Рис. 7. Схема разводки аналоговых цепей от разъема до входов MAX11046

ной структуры полосковых линий, приведенной на рисунке.

Общие требования к разводке печатной платы

Чтобы обеспечить наилучшие параметры многоканальной системы сбора данных с одновременной выборкой, необходимо выполнить другие важные требования к разводке печатной платы:

- Использовать многослойную печатную плату с отдельными слоями заземления.
- Аналоговые и цифровые цепи должны быть отделены друг от друга.
- Не проводить дорожки аналоговых и цифровых сигналов параллельно друг другу.
- Использовать один сплошной слой заземления с подводом цифровых сигналов с одной стороны и аналоговых — с другой.
- Использовать низкоимпедансный проводник минимальной длины для подключе-

ния этого заземления к земляному выводу источника питания.

- Шунтировать цепи аналогового (AV_{DD}) и цифрового (DV_{DD}) питания на заземляющий слой керамическими конденсаторами емкостью $0,1 \text{ мкФ}$ на каждый вывод и располагать эти конденсаторы как можно ближе к выводам микросхемы, чтобы минимизировать паразитную индуктивность.
- Добавить, по крайней мере, по одному конденсатору емкостью не менее 10 мкФ для шунтирования цепей аналогового и цифрового питания на каждой печатной плате.
- Соединить все цепи аналогового и цифрового питания с использованием двух сплошных слоев питания.
- Использовать слой AV_{DD} со стороны аналогового интерфейса MAX11046 и слой DV_{DD} со стороны цифрового интерфейса микросхемы.

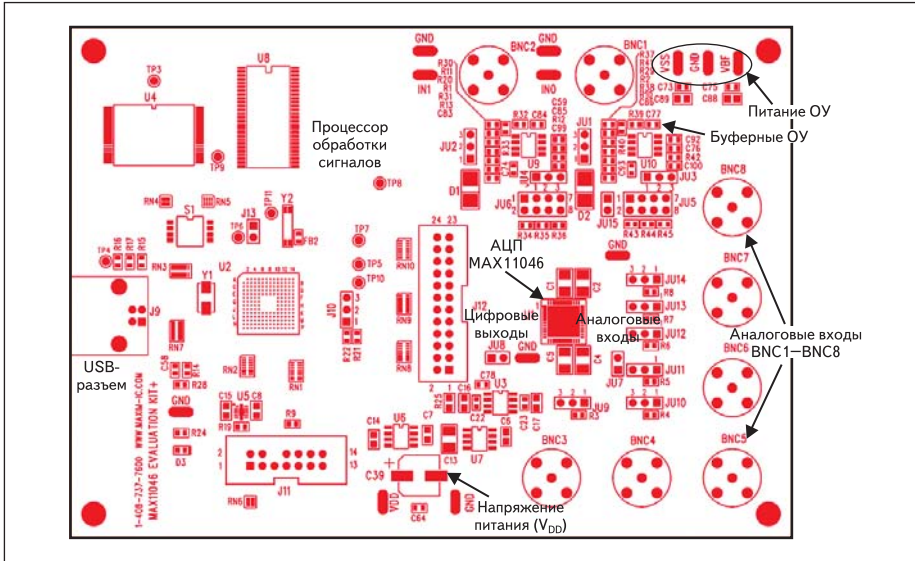


Рис. 8. Схема размещения компонентов 8-канальной системы сбора данных на основе MAX11046, доступная в качестве оценочного комплекта. Приведена верхняя сторона печатной платы

Пример оптимального размещения компонентов и разводки печатной платы для 8-канальной системы сбора данных на основе микросхемы MAX11046 приведен на рис. 8.

Эта конструкция основана на оценочном комплекте MAX11046 и использует 6-слойную печатную плату с одним заземляющим слоем и отдельными слоями питания.

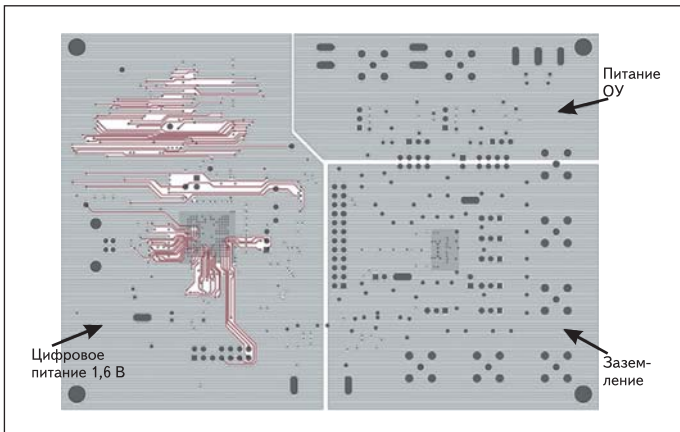


Рис. 9. Пример построения цепей питания в слое 2 печатной платы 8-канальной системы сбора данных на основе MAX11046

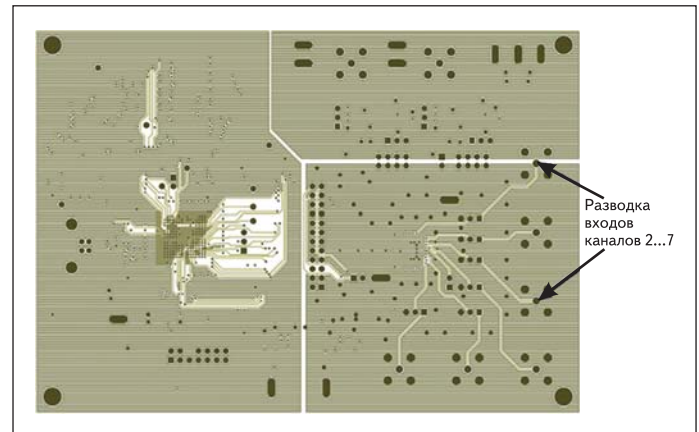


Рис. 10. Пример построения цепей экранирования сигналов в слое 3 печатной платы 8-канальной системы сбора данных на основе MAX11046



Рис. 11. Пример построения цепей питания в слое 4 печатной платы 8-канальной системы сбора данных на основе MAX11046

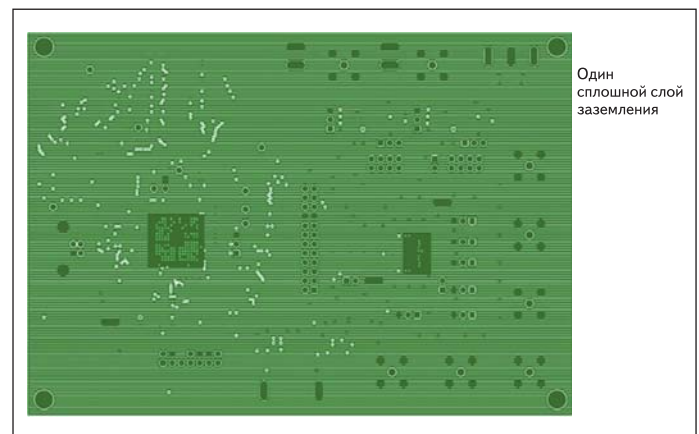


Рис. 12. Пример сплошного слоя заземления с подводом цифровых сигналов с одной стороны и аналоговых — с другой в слое 5 печатной платы

Прецизионные аналоговые сигналы от датчиков или генератора сигналов могут быть подключены к плате при помощи экранированных коаксиальных разъемов BNC1–BNC8. Входы BNC1 и BNC2 могут быть сконфигурированы как для прямого подключения к входам АЦП, так и для использования дополнительного буферного усилителя, что требуется для работы с частотой более 100 000 выборок/с. Входы BNC3–BNC8 предназначены только для прямого подключения. Внешние сигналы подаются непосредственно на входы АЦП без использования буферных усилителей. Такое упрощение конструкции привело к необходимости использования качественных цепей экранирования входных сигналов (рис. 9–11).

Применение специальных слоев питания для подключения цепей аналогового и цифрового питания показано на рис. 11, 13. Слои питания позволяют значительно уменьшить сопротивление, емкость и индуктивность дорожек питания и, следовательно, улучшить шумовые параметры цепей питания.

Использование одного сплошного слоя заземления с подводом цифровых сигналов с одной стороны и аналоговых — с другой показано на рис. 12.



Рис. 13. Гистограмма выходного сигнала для системы сбора данных до оптимизации разводки печатной платы

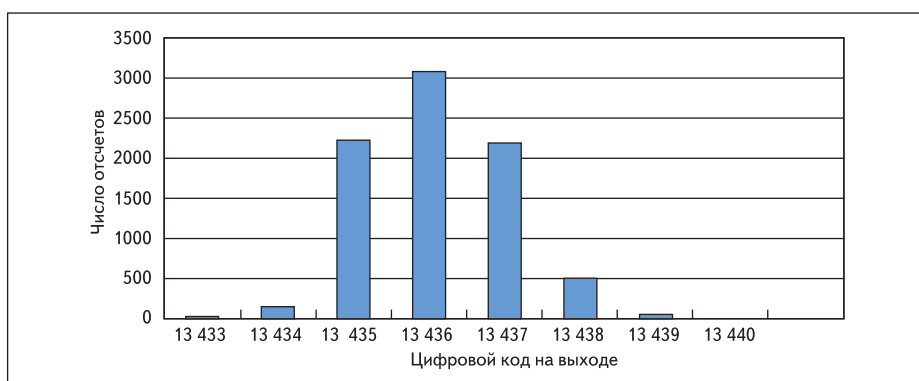


Рис. 14. Гистограмма выходного сигнала для системы сбора данных после оптимизации разводки цепей питания, заземления и входных сигналов

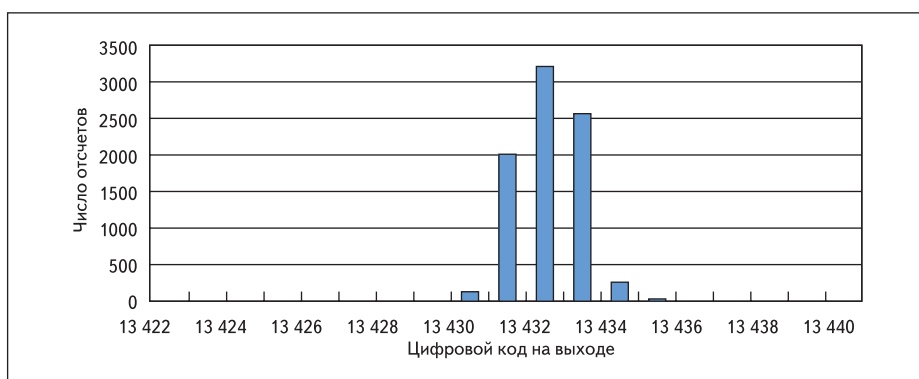


Рис. 15. Гистограмма выходного сигнала для системы сбора данных Maxim

Результаты измерений

Некоторые результаты измерений промышленного прототипа многоканальной системы сбора данных на основе АЦП MAX11046 с одновременной выборкой приведены на рис. 13–15. На входы АЦП подавался прецизионный сигнал 2,048 В от источника опорного напряжения MAX6126. Диапазон выходных сигналов АЦП составляет $\pm 32\,768$. На рис. 13 представлены результаты измерения для прототипа печатной платы, построенного без учета приведенных требований по разводке цепей питания и входных сигналов.

Результаты измерений показывают, что шумы и помехи снижают эффективное раз-

решение АЦП до уровня порядка 11,5 бит. Гистограмма измерений отличается крайней нестабильностью, что отображает непредсказуемость результатов.

На рис. 14 приведены результаты измерений после некоторых усовершенствований конструкции печатной платы, направленных на оптимизацию цепей питания, заземления и входных сигналов. Гистограмма выходного сигнала показывает значительное улучшение параметров системы и достижение эффективного числа разрядов порядка 13,5 бит. Гистограмма стала хорошо повторяемой, что отражает значительно возросшую стабильность измерений.

На рис. 15 приведены результаты измерений на системе сбора данных производства

Maxim при тех же условиях измерения. Гистограмма выходного сигнала показывает, что эффективное число разрядов стало равно 14 битам. Гистограмма обладает отличной повторяемостью, что отражает исключительную стабильность измерений и преимущества конструкции печатной платы Maxim.

Выводы

Высококачественные многоканальные системы сбора данных на основе АЦП с одновременной выборкой типа MAX1308, MAX1320 и MAX11046 можно применять в современных устройствах сбора данных. Они удовлетворяют или даже превышают расширенные требования к «интеллектуальным» системам контроля цепей питания [3] или требования к ультрасовременным системам управления трехфазными двигателями.

Чтобы достичь высоких параметров систем сбора данных и соответствовать параметрам этих АЦП, необходимо обратить пристальное внимание на конструкцию устройства. Особого внимания требуют: низкочастотная фильтрация входных сигналов, малощумящие буферные усилители и источник опорного напряжения, расположение компонентов, разводка печатной платы, фильтрация шумов и пульсаций напряжения питания. При внимательном отношении к этим принципам конструирования новое поколение высококачественных АЦП обеспечит превосходные результаты.

За дополнительной информацией обращайтесь к официальным дистрибьюторам Maxim в России: www.maxim-ic.ru/contact.

Литература

1. Application note 270, “Analog-Signal Data Acquisition in Industrial Automation Systems.”
2. Application note 748, “The ABCs of ADCs: Understanding How ADC Errors Affect System Performance.”
3. Application note 4281, “Advanced Power-Line Monitoring Requires a High-Performance, Simultaneous-Sampling ADC”. («Улучшенный контроль цепей питания требует высококачественных АЦП с одновременной выборкой»).