

№6 (118), 2013 г.

Информационно-технический
журнал

Учредитель — ООО «КОМПЭЛ»

Издается с 2005 г.

Свидетельство о регистрации:
ПИ № ФС77-43993

Редактор:

Геннадий Каневский
vesti@compel.ru

Выпускающий редактор:

Снежана Холодова

Редакционная коллегия:

Андрей Агеноров
Евгений Звонарев
Сергей Кривандин
Александр Маргелов
Николай Паничкин
Борис Рудяк

Дизайн, графика, верстка:

Елена Георгадзе
Екатерина Беляева
Евгений Торочков

Распространение:

Снежана Холодова

Электронная подписка:

www.compeljournal.ru

Отпечатано:

«Гран При»
г. Рыбинск

Распространяется бесплатно

Тираж — 1500 экз.
© «Новости электроники»

Подписано в печать:
20 августа 2013 г.

СОДЕРЖАНИЕ

БРЕНД НОМЕРА: *MAXIM INTEGRATED*

• Оборонительные укрепления: микросхемы Maxim для защиты сигнальных линий и линий питания <i>Вячеслав Гавриков</i>	4
• Goodbye, Shottky Diode! Здравствуй, высокая эффективность и компактность источников питания! <i>Андрей Колдунов</i>	11
• Все для работы с токовой петлей от Maxim Integrated <i>Роман Иванов</i>	15
• С технологией Auto Zero: новые операционные усилители для прецизионных измерений <i>Вячеслав Гавриков</i>	22
• Особенности топологии и параметров источников опорного напряжения <i>Билл Лаумайстер, Дэвид Фрай</i>	26
• Беспроводные системы – что нужно учесть при разработке? <i>Мартин Штойр</i>	32
• Все, что окружает ПЛИС – поставляет Maxim! <i>Павел Трибунский</i>	39



maxim
integrated™

В СЛЕДУЮЩЕМ НОМЕРЕ: ПЕРЕДАЧА И ОБРАБОТКА ДАННЫХ ОТ TEXAS INSTRUMENTS

- Power-Over-Ethernet-решения
- «Умные» сети на базе компонентов PLC от Texas Instruments
- Новые линейки микроконтроллеров на ядре Cortex-M4

Если вы хотите предложить интересную тему для статьи в следующий номер журнала – пишите на адрес vesti@compel.ru с пометкой «Тема в номер» или в рубрику «Я – автор» раздела «Разработчикам» сайта www.compel.ru.

ОТ РЕДАКТОРА



Уважаемые читатели!

Компания **Maxim Integrated** всегда была неординарным явлением на полупроводниковом рынке. Maxim привык удивлять — и нестандартными моделями бизнеса, и стойкостью в кризисные дни, и интенсивностью разработки и вывода на рынок новых аналоговых микросхем. И — не в последнюю очередь — краткостью, энергичностью и парадоксальностью формулировок, которыми отличались интервью руководителей. Здесь, конечно, следует прежде всего вспомнить **Джека Гиффорда**, легендарного основателя компании. Но и нынешний президент и CEO **Тунч Долука** достойно продолжает эту традицию, формулируя задачи, стоящие перед компанией в год ее тридцатилетия. Да-да, время летит быстро, и в 2013 году Maxim отмечает 30 лет со времени основания. Вот некоторые положения, озвученные Тунчем Долукой в интервью Ричарду Уилсону («Electronics Weekly») в июле этого года:

- Ранее потребители предпочитали работать с поставщиками аналоговых компонентов, однако в наше время они ищут **партнеров, предлагающих готовые решения**. Это связано с тем, что схемотехнические разработки требуют значительного временного ресурса, а время выхода новой продукции на рынок все чаще становится решающим параметром. Компании, выпускающие аналоговые микросхемы, знают основные принци-

пы разработки конечного оборудования и все чаще применяют это знание при разработке высокоинтегрированных изделий.

- **Что изменилось в компании Maxim Integrated за 30 лет ее существования?** — Компания теперь структурно организована не по технологическому принципу, а по конечным применениям. У нее имеется портфолио интеллектуальной собственности на базе единой технологической платформы. Принцип интеграции, положенный во главу всей нашей деятельности, мы теперь считаем не просто желательным, а неизбежным для дальнейшего роста и развития. **Что осталось неизменным за 30 лет?** — Принципы высокой производительности и высокой интеграции в сочетании с низким энергопотреблением — это те принципы, которые сделали компании имя, и мы не собираемся от них отказываться. Они лежали в основе самых известных разработок компании. Это ставший стандартом отрасли на десятилетия приемопередатчик интерфейса **MAX232** — настоящий хит, объединивший на одном кристалле два источника питания и несколько интерфейсных приемников и передатчиков. Это и принесший значительную прибыль компании первый в отрасли интегральный источник питания для ноутбуков **MAX786** (Тунч Долука не скрыл от интервьюера, что автором прототипа последней из упомянутых микросхем, носившего имя **MAX782**, был в 1991 году он сам,

тогда инженер-разработчик микросхем электропитания — *Г.К.*).

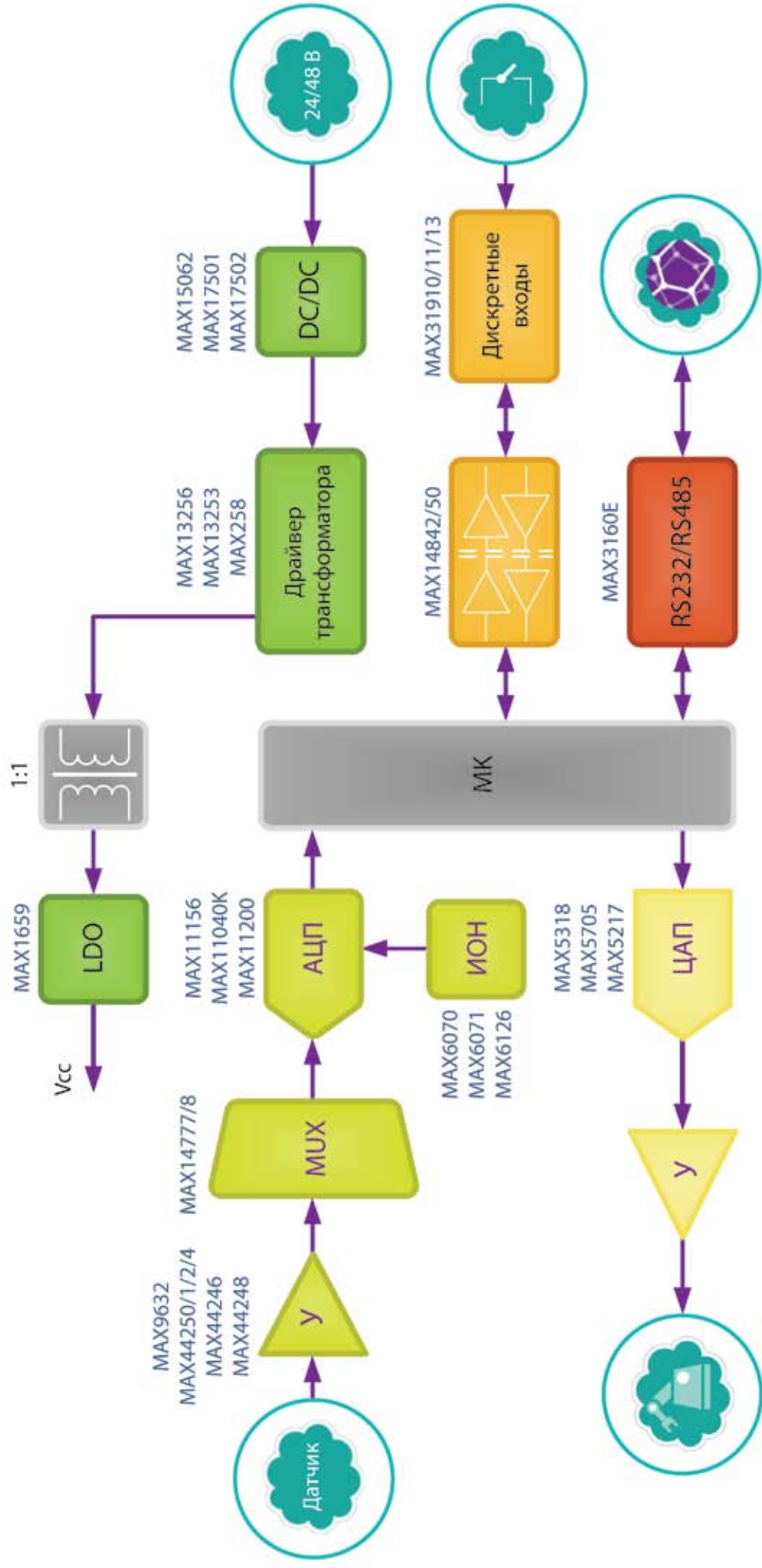
- **Главными направлениями** — двигателями развития — компании Maxim являются, прежде всего, отрасль производства **мобильных устройств**: это самый инновационный и быстрорастущий сектор рынка, и достижения на этом поле затем можно применять и в других отраслях. Еще две ключевые для компании отрасли — медицинская электроника, в которой происходит бум портативных носимых регистраторов, и автомобильная электроника, где идет объединение всех бортовых устройств в единую информационно-развлекательную сеть.

- **Главный тренд** в индустрии аналоговых полупроводников — быстрый и повсеместный переход к миниатюрным устройствам и форм-факторам.

В заключение остается напомнить, что со всеми вопросами по продукции Maxim Integrated можно обращаться к ее дистрибьютору с 2003 года, компании КОМПЭЛ.

С уважением,
Геннадий Каневский

КОМПЭЛ поставяет все для измерения, преобразования, передачи и обработки сигнала от компании Maxim Integrated



Вячеслав Гавриков (г. Смоленск)

ОБОРОНИТЕЛЬНЫЕ УКРЕПЛЕНИЯ: МИКРОСХЕМЫ MAXIM ДЛЯ ЗАЩИТЫ СИГНАЛЬНЫХ ЛИНИЙ И ЛИНИЙ ПИТАНИЯ



Компания **Maxim Integrated** известна своими решениями в области защиты от помех и электростатики. Новые специализированные интегральные микросхемы используют активный способ защиты устройств от перенапряжений, перегрузки по току, обратной полярности питания и электростатических помех. Созданные специально для промышленной и автомобильной электроники, эти микросхемы имеют широкий диапазон входных напряжений, высокую стойкость к негативным воздействиям, большой температурный диапазон.

Промышленные установки и автомобильное оборудование являются мощными источниками помех. Поэтому необходимо обеспечивать защиту линий питания, перегрузок по току, неверной полярности питающих напряжений, электростатических разрядов. Существует несколько способов защиты:

- использование компонентов со встроенной защитой от аварийных ситуаций;
- построение внешних схем защиты на дискретных компонентах;
- использование внешних специализированных микросхем активной защиты.

Использование микросхем со встроенной защитой не всегда возможно, так как они имеют более высокую стоимость и не способны справляться с мощными помехами. В жестких условиях промышленной и автомобильной электроники использование внешних цепей остается единственным надежным способом избежать повреждения оборудования.

Схема защиты от помех на дискретных элементах и ее недостатки

Типовая схема защиты на дискретных компонентах (рисунок 1) позволяет достаточно эффективно бороться со всеми типами помех. Для защиты от перенапряжений используют TVS-диод (D2), либо варистор (U). Защиту от перегрузки по току обеспечивает предохранитель (FU1), или термистор (R1). Диод (D1) необходим на случай неправильной полярности питающего напряжения и для защиты от импульсов

обратной полярности. Помехи от переключений нагрузок фильтруются при помощи конденсатора (C1).

Реализация защиты на дискретных элементах имеет следующие преимущества: низкую стоимость, простоту монтажа, высокую степень защиты от самых мощных помех. Однако, есть и недостатки (таблица 1).

Недостатки защиты от перенапряжений с помощью TVS-диодов (D2) достаточно очевидны. Дело в том, что ВАХ TVS-диода (рисунок 2а) имеет наклон в области ограничения. Величина напряжения ограничения ($U_{огр}$) зависит от величины тока, а значит — и от мощности помехи. Так у TVS-диода **SM6T30A** напряжение пробоя $U_{пр} = 28,5$ В, а напряжение ограничения $U_{огр} = 41,5$ В при токе 14,5 А. Соответственно, сама микросхема питания, имея рабочее напряжение до 28,5 В, должна выдерживать пульсации до 41,5 В.

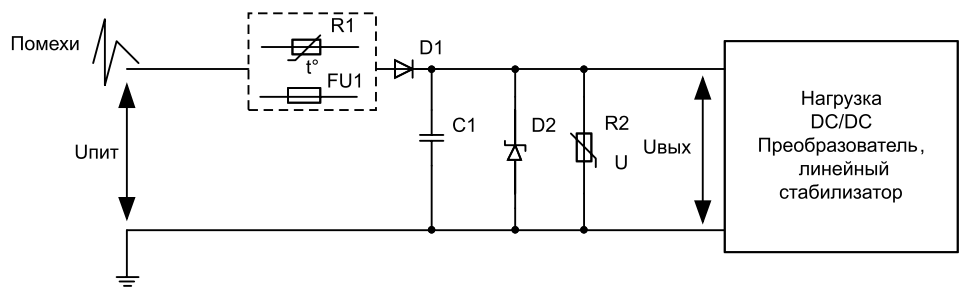


Рис. 1. Схема защиты на дискретных компонентах

Таблица 1. Недостатки дискретной защиты

Тип защиты	Реализация	Недостатки
Защита от перенапряжения	TVS-диод	Величина напряжения ограничения зависит от мощности помехи Микросхемы питания устройства должны иметь широкий диапазон входных напряжений
	Варистор	Величина напряжения ограничения зависит от мощности помехи Большое время срабатывания
Защита от перегрузки по току	Предохранитель	Необходимость замены при выгорании
	Термистор	Большая рассеиваемая мощность Повышение нижнего порога питающего напряжения
Защита от неверной полярности питающего напряжения	Диод	Большая рассеиваемая мощность Повышение нижнего порога питающего напряжения

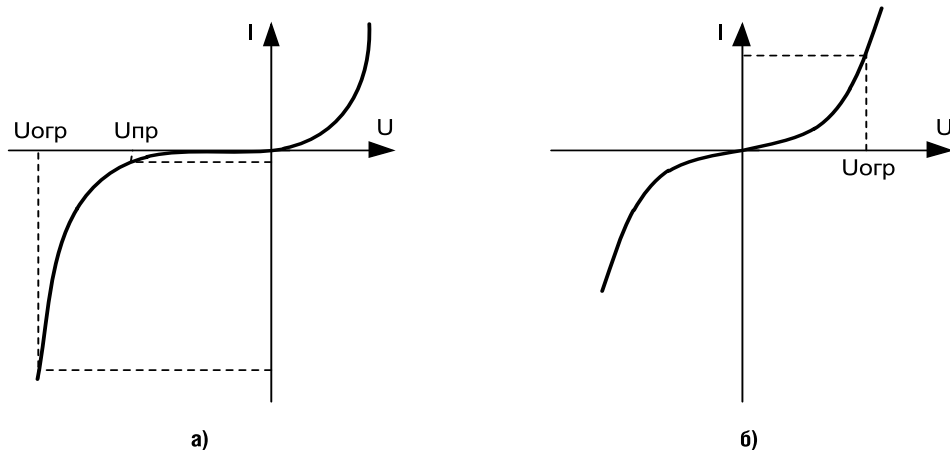


Рис. 2. BAX TVS диода (а) и варистора(б)

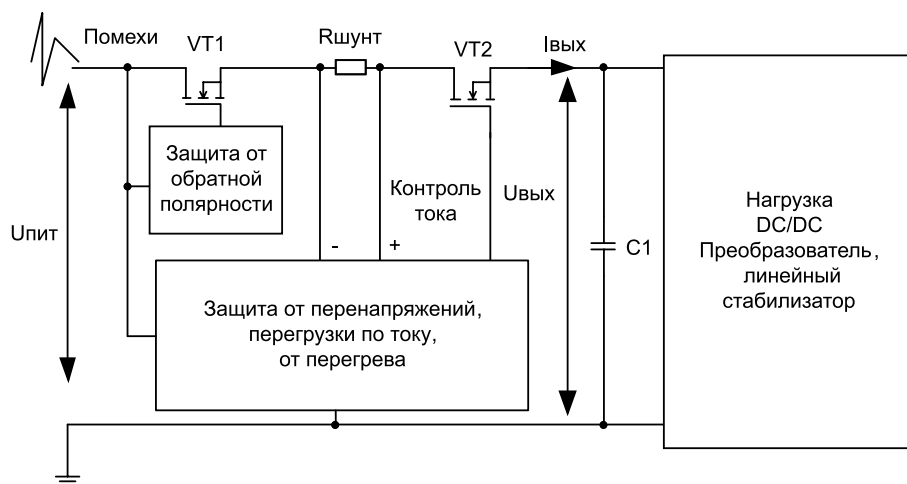


Рис. 3. Упрощенная схема активной защиты

Аналогичным недостатком обладает варистор, у которого еще более пологая BAX (рисунок 2б), в результате разница между рабочим напряжением и напряжением ограничения еще больше, чем в случае с TVS.

Плавкие предохранители (F1), используемые для защиты от перегрузки по току, требуют ручной замены в случае выхода из строя, что весьма проблематично, так как для этого необходим обслуживающий персонал. При использовании термистора (R1), на нем выделяется большая мощность, если прибор потребляет большой ток.

Диод D1, защищающий схему от неверной полярности питания, имеет два главных недостатка. Во-первых, при протекании прямого тока на нем выделяется большая мощность. Нетрудно подсчитать, что при токе в 10 А на диоде Шоттки ($U_{пр} = 0,5 \text{ В}$) выделится 5 Вт. Отвод тепла в этом случае станет серьезной задачей. Во-вторых, падение напряжения увеличит минимальный порог входного напряжения. Так, например, если микросхема питания защищаемого устройства работает в диапазоне 7...30 В, то падение напряжения на диоде ($U_{пр} = 0,5 \text{ В}$) приведет к тому, что минимальное входное напряжение увеличится до 7,5 В.

Метод активной защиты от мощных помех

Активная схема защиты от помех лишена недостатков дискретной схе-

Таблица 2. Защитные микросхемы для промышленных и коммерческих приложений

Наименование	Диапазон входных напряжений, В	Максимальный ток, А	Сопротивление, мОм	Особенности	Корпус
MAX14586 MAX14590	2,2...36	3	40	Защита от перенапряжений Программируемый уровень перенапряжения Встроенная установка уровня перенапряжения 7 В (MAX14586) и 15 В (MAX14590) Защита от перегрева Система плавного включения	8 TDFN-EP
MAX14571 MAX14572 MAX14573	4,2...36	4,2	100	Программируемый уровень перенапряжения Программируемый уровень тока Программируемый нижний порог напряжения Выход состояния FAULT Работа в режиме автовключения (MAX14571) Работа в режиме без автовключения (MAX14572) Работа в режиме ограничения тока (MAX14573) Защита от перегрева	14 TSSOP-EP
MAX14588	4,5...36	1	190	Программируемый уровень перенапряжения Программируемый уровень тока Программируемый нижний порог напряжения Выход состояния FAULT Работа в режиме автовключения (CLTS2 = 0, CLTS1 = 1) Работа в режиме без автовключения (CLTS2 = 0, CLTS1 = 0) Работа в режиме ограничения тока (CLTS2 = 1) Защита от перегрева	16 TQFN-EP
MAX14575	2,3...5,5	2,5	32	Программируемый уровень тока Защита от обратного тока и короткого замыкания Защита от перегрева Работа в режиме автовключения (MAX14575A, MAX14575AL) Работа в режиме без автовключения (MAX14575B) Работа в режиме ограничения тока (MAX14575C)	8 TDFN-EP

мы. Суть данного решения заключается в том, что неэффективные элементы (диоды, предохранители) заменяются транзисторами (рисунок 3), управление которыми осуществляется при помощи дополнительных интеллектуальных элементов.

Транзистор VT2 заменяет TVS-диод D2 (рисунок 1) и служит для защиты от перенапряжений. Система защиты постоянно контролирует входное напряжение. Как только входное напряжение превысит пороговое значение, схема защиты отключает транзистор VT2. При этом, возможно несколько вариантов повторного включения (рисунок 4).

1. Без автоматического включения — включение транзистора произойдет только после сброса схемы защиты, либо после повторной подачи питания (рисунок 4а).

2. С автовключением — в этом случае происходит автоматический сброс схемы защиты по истечении таймаута Tretray и транзистор включается вновь (рисунок 4б).

3. Схема с активным ограничением напряжения. Транзистор включается только после того, как напряжение вернется в допустимый диапазон с учетом гистерезиса (рисунок 4в).

Очевидно, что главный недостаток TVS-диода устраняется — напряжение ограничения может быть задано с точностью до милливольт.

Защита от перегрузки по току осуществляется с помощью VT2. Как и в случае с перегрузкой по напряжению, при превышении значения допустимого тока схема защиты выключает транзистор VT2. Повторное включение также возможно различными способами: с автоматическим включением после таймаута (рисунок 5а), без автоматического включения (рисунок 5б), с активным ограничением тока (рисунок 5в). Таким образом, отпадает необходимость менять сгоревший предохранитель. Малое значение сопротивления шунта уменьшает выделение тепла и не повышает нижний порог напряжения, в отличие от термисторов.

Защита от отрицательных выбросов напряжения и от неверной полярности питания реализована с помощью транзистора VT1 (рисунок 2) вместо диода VD1 (рисунок 1). При работе в нормальном режиме транзистор открыт. Благодаря низкому сопротивлению канала, потери мощности и падение напряжения на нем гораздо меньше, чем на диоде.

Помимо прочего, можно контролировать и нижний порог входного напряжения. При понижении входного напряжения ниже допустимого уровня транзистор VT2 отключается. С одной стороны, это дает дополнительную защиту от короткого замыкания, с дру-

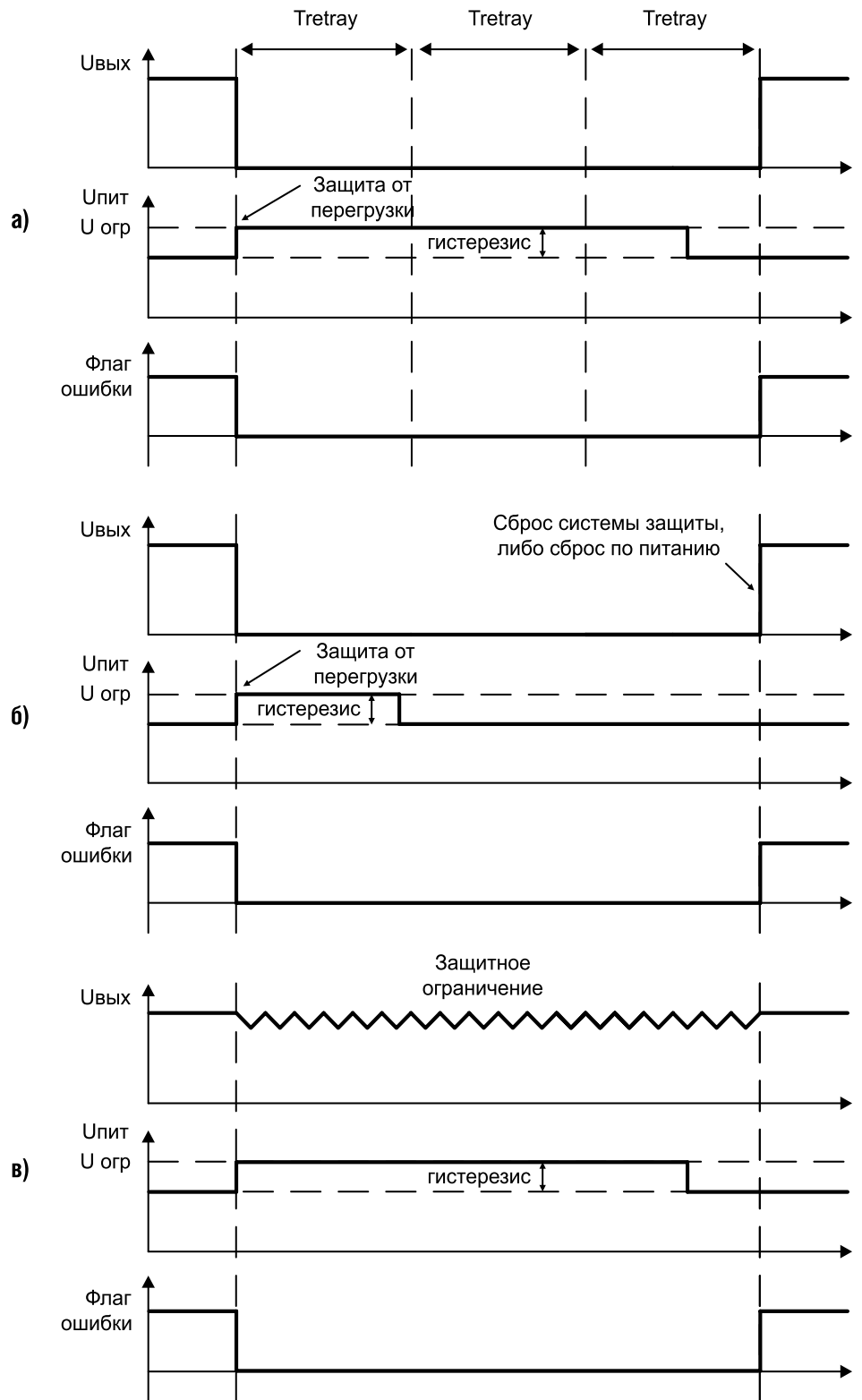


Рис. 4. Активная защита от перенапряжений

гой — позволяет разрешать работу устройств только в жестко заданном диапазоне входных напряжений.

Следует четко понимать, что, хотя схема активной защиты по ряду параметров превосходит схему на дискретных элементах, она все же не может в одиночку обеспечить надежную защиту в жестких условиях. Поэтому для защиты от самых мощных помех необходимо использовать дополнительные дискретные элементы.

Компания Maxim Integrated выпускает несколько линейк микросхем активной защиты для различных областей, таких как промышленные приложения, автомобильная техника, потребительская электроника.

Микросхемы защиты от мощных помех в промышленной и коммерческой электронике

Maxim Integrated постоянно расширяет спектр интегральных микросхем

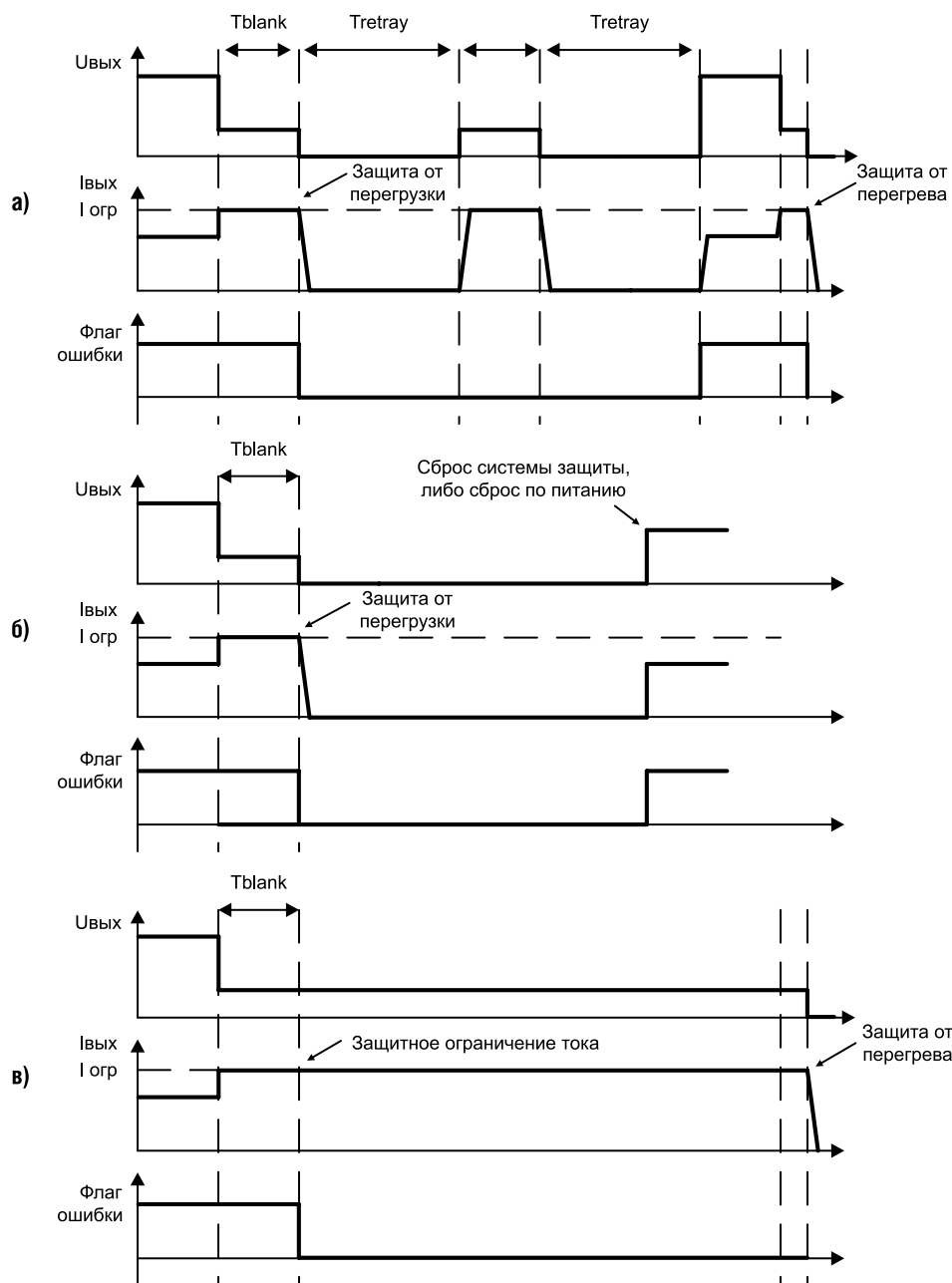


Рис. 5. Активная защита от перегрузки по току

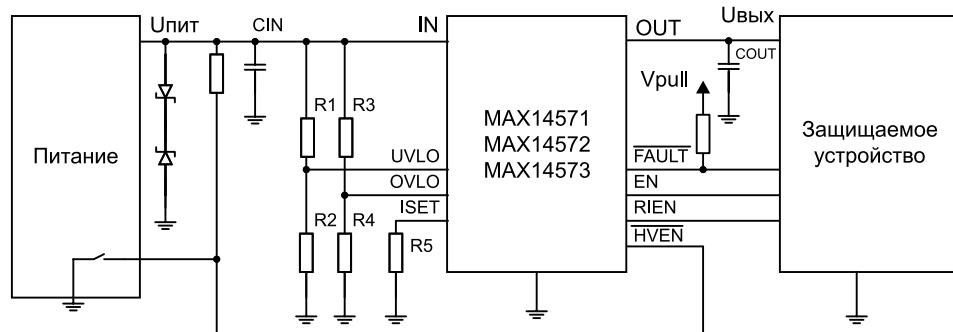


Рис. 6. Применение специализированной микросхемы со встроенным ключом на примере MAX14575

для защиты линий питания. Новые образцы для промышленной и коммерческой электроники (таблица 2), имеют в своем составе встроенные ключи, что упрощает схему (рисунок 6) и уменьшает занимаемую площадь.

Серия **MAX14571/72/73** представляет собой интеллектуальные микросхемы с полным комплектом защитных механизмов (рисунок 6):

- Защита от перегрузки по току имеет программируемый уровень тока

ограничения (вплоть до 4,2 А). Уровень тока задается резистором R5. **MAX14571** работает в режиме автовыключения (рисунок 3а), **MAX14572** – в режиме без автовыключения (рисунок 3б), а **MAX14573** – в режиме ограничения тока (рисунок 3в).

- Защита от перенапряжения позволяет задавать уровень напряжения ограничения с помощью резистивного делителя R3/R4. Это позволяет защищать устройства с различными уровнями питания 4,2...36 В.
- Защита от пониженного напряжения питания позволяет задавать окно рабочих напряжений.
- Все микросхемы имеют встроенную защиту от перегрева.
- Дополнительной особенностью является защита от обратно протекающего тока.

Выход ошибки FAULT позволяет судить о состоянии микросхемы.

Для расширения защитного диапазона напряжений на входе необходимо разместить пару встречных TVS-диодов. Это особенно важно для промышленных модульных систем, в которых используется «горячее» подключение устройств. Так, например, для питающего напряжения 24 В импульсы при подключении могут превосходить 40 В.

Помимо низковольтного входа разрешения работы (EN) микросхемы имеют и высоковольтный вход (HVEN), который может управляться внешней системой.

Широкий диапазон обеспечиваемых напряжений питания позволяет применять эти микросхемы в промышленных системах (в том числе – с напряжениями 24 В), в бытовой электронике и в устройствах с батарейным питанием.

Микросхема **MAX14588** по своим характеристикам и защитным механизмам близка к семейству MAX14571/2/3, но имеет еще большие возможности. Главная ее особенность – возможность программирования режима работы при перегрузках по току (таблица 2). При помощи дополнительных входов (CLTS1, CLTS2) можно установить режим как с ограничением тока, так и с защитным отключением (с автовыключением, либо без него). Столь обширные защитные и интеллектуальные возможности позволяют применять данную микросхему в системах промышленных датчиков, системах сбора информации, автоматического контроля и др.

Микросхемы **MAX14586** и **MAX14590** разработаны специально для портативных устройств (планшеты, смартфоны). Мобильные устройства всегда имеют разъем для подключения зарядного устройства, на котором при подключении/отключении (особенно в процессе заряда батареи) могут генерироваться большие выбросы напряжения.

Таблица 3. Краткое описание тестовых импульсов

Тип	Описание	Амплитуда (12 В/24 В), В		Число импульсов или время теста	Длительность, с	
		мин.	макс.		мин	макс
1	Выброс обратной полярности. Возникает, например, когда устройство и включенная параллельно ему индуктивность совместно отключаются от питающей сети.	-75/-450	-100/-600	5000 импульсов	0,5	5
2a	Выброс положительной полярности. Если несколько устройств подключены к питанию одним высокоиндуктивным проводом, то отключение одного из них вызовет скачок напряжения на другом.	+37/+37	+50/+50	5000 импульсов	0,2	5
2b	Импульсы положительной полярности. Возникают, когда после выключения двигателя постоянного тока он продолжает некоторое время вращаться и работать в режиме генератора.	+10/+20	+10/+20	10 импульсов	0,5	5
3a	По природе аналогичен импульсу 1, но имеет более короткую длительность и меньшую энергию. Также возникает в результате коммутационных процессов.	-112/-150	-150/-200	1 час	0,09	0,1
3b	По природе аналогичен импульсу 2a, но имеет более короткую длительность и меньшую энергию. Также возникает в результате коммутационных процессов.	+75/+150	+100/+200	1 час	0,09	0,1
4	Представляет собой «просадку» питающего напряжения. Возникает, например, при заводе холодного двигателя.	-6/-12	-7/-16	1 импульс	не чаще 1 в минуту	не чаще 1 в минуту
5a	Имитирует аварийное отключение (обрыв) аккумулятора при работающем генераторе. Система без защитных диодов на генераторе	+65/+123	+87/+173	1 импульс	0,04	0,4
5b	Имитирует аварийное отключение (обрыв) аккумулятора при работающем генераторе. Система со встроенными защитными ограничивающими диодами	+65/+123	+87/+173	1 импульс	не чаще 1 в минуту	не чаще 1 в минуту

MAX14586 и MAX14590 обеспечивают защиту от перенапряжений. Уровень ограничения задается внешним делителем. При необходимости можно использовать интегрированный делитель — при этом напряжение ограничения составляет 7 В (MAX14586) и 15 В (MAX14590).

Микросхемы отвечают специфическим требованиям мобильных устройств: работают с питающими напряжениями вплоть до 2,2 В; выпускаются в миниатюрном высокоэффективном TDFN-корпусе; имеют низкое собственное потребление; требуют минимума внешних компонентов; имеют возможность плавного пуска.

Микросхемы **MAX14575x** представляют собой устройства с защитой от перегрузки по току, предназначенные для защиты внешних интерфейсов (например, USB). Уровень ограничиваемого тока задается с помощью одного внешнего резистора. Малый размер корпуса, низкое потребление (130 мкА), минимальное сопротивление ключа (32 мОм) позволяют использовать **MAX14575** в мобильных и портативных устройствах. Варианты MAX14575 имеют различные режимы ограничения тока (таблица 2).

Способы защиты от помех в промышленной и автомобильной электронике похожи, однако имеется ряд от-

Таблица 4. Классификация устройств по защищенности от помех по питанию

Класс	Описание
A	Все свойства прибора сохраняются в течение тестирования и после его завершения.
B	Все свойства прибора сохраняются в течение тестирования. Однако один или несколько параметров могут выйти за границы заданной точности. Все функции автоматически возвращаются в заданные рамки после снятия воздействия. Функции памяти должны соответствовать классу A.
C	Прибор не способен выполнять одну или несколько своих функций в течение испытаний. Однако при снятии воздействий все функции автоматически восстанавливаются.
D	Прибор не способен выполнять одну или несколько своих функций в течении испытаний. Функциональность восстанавливается по истечении испытаний, но только после ручного сброса оператором/пользователем.
E	Прибор не способен выполнять одну или несколько своих функций в течении испытаний. Функциональность не восстанавливается после испытаний. Восстановление возможно только после ремонта или замены прибора.

личий. Требования к автомобильной электронике описываются в отдельных стандартах.

Требования стандарта ISO7637 к автомобильной электронике

Одним из основных стандартов автомобильной электроники является ISO7637. Стандарт применим к электронному и электрическому оборудованию, установленному на борту легковых пассажирских и коммерческих автомобилей с бортовой сетью 12 и 24 В. Документ состоит из трех частей. Вторая часть (ISO7637-2) классифицирует ав-

томобильное оборудование по устойчивости к помехам, распространяемым по линиям питания.

Стандарт определяет схемы проведения испытаний, типы тестовых воздействий (помех), измерительное оборудование и сами методы измерений. Заданные типы воздействий (таблица 3) призваны имитировать реальные ситуации, происходящие в автомобильной бортовой сети.

Стандарт описывает параметры импульсов (амплитуду, длительность), их количество. По результатам испытаний на устойчивость к каждому типу помех

Таблица 5. Защитные микросхемы для автомобильной электроники

Наименование	Напряжение ограничения, В	Тип защиты от перенапряжений	Особенности	Корпус
MAX16126	подстраиваемое 3...30 В	ограничение	Есть выход ошибки FAULT	12 TQFN-EP
MAX16127TCA		выключение с автозапуском	Защита от перегрева	
MAX16127TCB		выключение с одним перезапуском	Защита от обратной полярности батареи	
MAX16127TCC		выключение с тремя перезапусками	Защита от низкого уровня напряжения	
MAX16127TCD		выключение		
MAX16128	13,64; 15; 18,6; 20,93; 24,16; 28,66; 31,62	выключение с автозапуском	Есть выход ошибки FAULT	8 uMAX
		выключение с одним перезапуском	Защита от перегрева	
		выключение с тремя перезапусками	Защита от обратной полярности батареи	
		выключение	Защита от низкого уровня напряжения	
MAX16129	ограничение	Защита от холодного запуска двигателя		

Таблица 6. Защитные диодные сборки Maxim

Наименование	Число каналов	Рабочее напряжение, В	Входная емкость, пФ	Корпус	Область применения
MAX3202E	2	0,9...5,5	5	4WLP	USB, USB2.0
MAX3203E	3			6TDFN-EP	Ethernet
MAX3204E	4				FireWire
MAX3206E	6				SVGA
MAX3205E	6		9WLP, 16TQFN-EP	DVI	
MAX3207E	2		2	6SOT23	USB, USB2.0
MAX3208E	4		2	10uMAX, 16TQFN-EP	FireWire

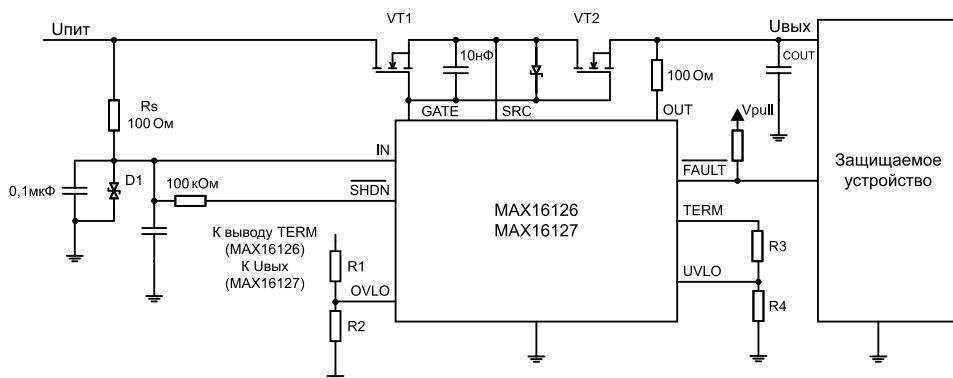


Рис. 7. Схема защиты для автомобильной электроники

устройству присваивается уровень защищенности (таблица 4).

Стоит отметить, что в автомобилях основная защита от коротких замыканий всегда осуществляется предохранителями. В итоге необходимость в защите от перегрузки по току не нормируется стандартом.

Стандарт достаточно строг, но использование защитных микросхем Maxim Integrated позволяет обеспечить требуемый уровень защиты.

Микросхемы защиты от мощных помех в автомобильной электронике

Инженеры Maxim Integrated с учетом требований стандарта выпустили специальную линейку микросхем активной защиты для автомобильной электроники (таблица 5). Микросхемы рассчитаны на защиту мощных потребителей.

Для повышения мощности используется пара внешних транзисторов. Один из транзисторов необходим для защиты от переплюсовки аккумулятора.

Микросхемы **MAX16126**/**MAX16127** могут работать в автомобилях с бортовой сетью как 12 В, так и 24 В. Уровень рабочих напряжений составляет 3...30 В. В таких же диапазонах могут задаваться значения напряжений ограничения (максимально и минимально допустимые напряжения).

Максимально допустимое напряжение задает делитель R1/R2 (рисунок 7). Интересной особенностью MAX16127 является то, что данный делитель подключается непосредственно к выходу. Такая схема позволяет контролировать непосредственно уровень выходного напряжения. В результате при работе в режиме с автовключением за-

щищаемое устройство получает питание даже при постоянном перенапряжении. Существуют модификации, работающие в различных режимах в условиях перенапряжения (таблица 5). В микросхеме MAX16126 реализован метод ограничения напряжения в случае перегрузки (см. рисунок 4в).

Делитель R3/R4 задает минимальное значение входного напряжения.

Дополнительными особенностями микросхем является защита от обратной полярности батареи при помощи VT 1 (рисунок 7) и защита от перегрева.

Для расширения защитного диапазона необходимо использовать пару встречных TVS-диодов. Это позволяет расширить диапазон -36...+90 В.

Микросхемы **MAX16128**/**MAX16129** сходны с микросхемами MAX16126/MAX16127. Однако они имеют две основные особенности:

1. Уровень ограничения напряжений жестко задан и отражается в маркировке микросхемы. Первый суффикс определяет уровень ограничения от перенапряжений. Второй суффикс отражает минимально допустимое напряжение питания. Отсутствие внешних резистивных делителей позволяет уменьшить число внешних компонентов и сократить занимаемую площадь.

2. Защита от холодного пуска позволяет отключать транзистор, как только напряжение питания просядет до величины, меньшей чем заданное значение. Уровень ограничения задается жестко и

отражается при помощи третьего суффикса в маркировке микросхемы.

Микросхемы защиты токовой петли

Кроме защиты линий питания, необходимо защищать сигнальные входы/выходы.

Одна из проблем промышленного оборудования — защита токовых датчиков (рисунок 8). Для защиты токовых петель создана микросхема **MAX14626**. Она имеет встроенный транзистор и схему защиты от перегрузки по току. Ток ограничения составляет 30 мА. Широкий диапазон напряжений (2,3...40 В) и низкое потребление (50 мкА) позволяют применять микросхему в мобильных устройствах.

Помимо защиты от перегрузки по току, имеется защита от перенапряжений, которая обеспечивается интегрированными защитными диодами. Защита от перегрева и от неверной полярности напряжения делают микросхему более живучей в промышленных условиях.

MAX14626 выпускается в 6-TDFN-корпусе для рабочего диапазона температур -40...85°C.

Внешняя защита от статического электричества

Как показывает практика, главным разрушающим фактором, помимо мощных помех, являются электростатические разряды. Они возникают при сближении разнозаряженных элементов. Например, при подключении/отключении устройств или при прикосновении. Известно, что человек в кожаной обуви при ходьбе генерирует электрическое напряжение 25 кВ. Очевидно, что в промышленной и автомобильной технике вращающиеся и трущиеся части механизмов создают колоссальные статические заряды. Статика приводит к катастрофическим для электроники последствиям. Пробой затворов транзисторов, деградация полупроводников и даже разрушение контактных соединений — вот лишь часть возможных повреждений.

Надежным и доступным способом защиты от электростатики являются защитные диоды. Компания Maxim Integrated выпускает широкий спектр дискретных элементов защиты (таблица 6).

MAX3202/3/4/6 соответствуют уровню защиты от следующих уровней разрядов: ±15 кВ (Human Body Model), ±8 кВ (IEC 61000-4-2, Contact Discharge), ±15 кВ (IEC 61000-4-2, Air-Gap Discharge). Применяются для высокоскоростных интерфейсов (таблица 5).

MAX3205/7/8 предназначены для защиты высокоскоростных дифференциальных интерфейсов. Имеют расширенный диапазон рабочих температур -40...125°C. Уровень защиты соответствует: ±15 кВ (Human Body

Model), ±8 кВ (IEC 61000-4-2, Contact Discharge), ±15 кВ (IEC 61000-4-2, Air-Gap Discharge).

Заключение

Микросхемы активной защиты Maxim Integrated для промышленной и коммерческой техники имеют встроенные транзисторы, возможность задания допустимых уровней напряжений и токов. Все это делает их идеальными для защиты от перегрузки по току, перенапряжений и статики.

Серия MAX12126/7/8/9 разработана для автомобильной электроники и помогает создавать устройства, соответствующие самым строгим требованиям стандарта ISO 7637.

Цепи токовых датчиков могут быть защищены при помощи MAX14626. Ограничение тока 30 мА и защита от статики позволяют защитить чувствительные измерительные цепи от жестких внешних условий.

Помимо микросхем активной защиты, выпускается широкий спектр диодов для борьбы со статикой. Высокоскоростные интерфейсы мобильных устройств, такие как USB, FireWire, Ethernet, надежно защищаются диодами серии MAX320x.

Литература

1. Robert Regensburger. APPLICATION NOTE 4240. Active

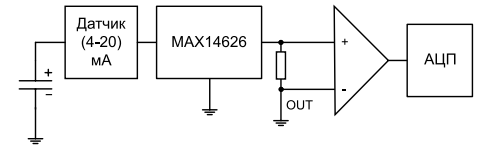


Рис. 8. Схема защиты токовой петли

High-Voltage Transient Protectors Trump Conventional Approaches in Automotive Electronics. Maxim Integrated. 2008

2. APPLICATION NOTE 5260. Design Considerations for a Harsh Industrial Environment. Maxim Integrated. 2012

3. Anatoly Andrushevich. APPLICATION NOTE 4850. Microcontroller Controls Current-Loop AFE Protection. Maxim Integrated. 2011

4. APPLICATION NOTE 651. ESD Protection for I/O Ports. Maxim Integrated. 2000

5. Datasheets, по представленным компонентам, взяты с официального сайта Maxim Integrated www.maximintegrated.com.

Получение технической информации, заказ образцов, поставка — e-mail: analog.vesti@compel.ru

MAX16126/MAX16127

схемы защиты от перегрузки/переплюсовки

- Диапазон входных напряжений: -36...+90 В
- Быстрое отключение с полной изоляцией нагрузки
- Программируемые пороги срабатывания
- Низкий ток питания и ток утечки

Москва
Тел.: (495) 234-7764, доб. 2328
Соколов Андрей
E-mail: a.sokolov@compel.ru

Санкт-Петербург
Тел.: (812) 327-9403, доб. 4219
Червинский Михаил
E-mail: cmv.spb@compel.ru

Компэл
www.compel.ru

Андрей Колдунов (г. Гродно)

GOODBYE, SCHOTTKY DIODE! ЗДРАВСТВУЙ, ВЫСОКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И КОМПАКТНОСТЬ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ!



Новое, расширяющееся семейство контроллеров **MAX15062** и **MAX17501/2** от Maxim Integrated содержит модели как для работы с небольшой нагрузкой (<300 мА), так и более мощные (>1 А). Особенности семейства являются **сверхминиатюрный корпус** и наличие **интегрированных MOSFET**, что позволяет построить недорогой, компактный, высокоэффективный DC/DC с широким входным диапазоном питающих напряжений и **минимумом внешних элементов** – для его работы необходимо всего 3...5 малогабаритных компонентов.

Источники питания (ИП) для промышленной и, особенно, автомобильной аппаратуры, должны быть спроектированы со значительным запасом по напряжению. Дело в том, что в реальных условиях эксплуатации на входные шины ИП воздействуют разнообразные помехи и наводки, а в автомобильной технике еще возможны аварийные ситуации (например, обрыв в цепи аккумулятора), которые не должны приводить к выходу из строя самого ИП и питаемого им устройства.

Требования по обеспечению электромагнитной совместимости в части устойчивости к электромагнитным помехам для устройств, подключаемых к электрическим сетям низкого напряжения, устанавливает стандарт ГОСТ Р 51317.6.1 – 2006 [1] (IEC 61000-6-1:2005). В частности, устройство должно выдерживать на шинах питания:

- Наносекундные импульсные помехи (длительность фронта импульса/длительность импульса 5/50 нс, частота импульсов 5 кГц) амплитудой ± 500 В,

- Микросекундные импульсные помехи (длительность фронта импульса/длительность импульса 1/50 мкс) амплитудой ± 500 В,

- Кондуктивные помехи, наведенные радиочастотными электромагнитными полями (частота 0,15...80 МГц, глубина амплитудной модуляции 80%, частота модуляции 1 кГц) напряжением 3 В.

Кроме того, источники питания для модулей промышленного оборудования должны корректно работать при любом входном напряжении в пределах 12...24...36 В, иметь высокий КПД, а также минимальные размеры. Поэтому обычно приходится использовать срав-

нительно высоковольтный преобразователь напряжения (с максимально допустимым входным напряжением от 50 В и выше) и, желательно, синхронный. Правильно спроектированный синхронный преобразователь имеет на 3...10% больший КПД, чем его несинхронные аналоги, и не нуждается в диоде, который обычно является самым большим после дросселя компонентом преобразователя. Размеры синхронного преобразователя зависят, в основном, только от размеров дросселя и конденсаторов фильтра, которые тем меньше, чем выше рабочая частота преобразователя. Поэтому для уменьшения размеров схемы современный преобразователь должен работать на частотах выше 300...500 кГц.

Требования к автомобильной электронике гораздо жестче, их регламентирует стандарт ГОСТ 28751-90 [2] (международные стандарты ISO 7637-2 и ISO 16750-2). В частности, в бортовой сети могут быть кратковременные повышения напряжения и импульсы амплитудой до 25...100 В обих полярностей – при включении/выключении индуктивных нагрузок, прерывании тока катушки зажигания, включении и отключении двигателя и при разнообразных коммутационных процессах. Конечно, в современном автомобиле имеются встроенные модули защиты, однако они не дают 100% гарантии. Поэтому, несмотря на довольно низкое напряжение в бортовой сети (порядка 12...14,4 В для автомобилей с 12 В бортовой сетью), разрабатываемые для автомобильных применений устройства должны выдерживать импульсы амплитудой до 100...110 В.

Для защиты цепей питания от импульсных помех обычно используют

интегрирующие RC- или LC-цепочки с конденсатором значительной емкости, дополняя их элементами активной защиты – варисторами или супрессорами. Для защиты от превышения напряжения можно использовать специализированные микросхемы – например, **MAX6397**/**MAX6398** (защита от повышенного напряжения) или **MAX16126**/**MAX16127** (защита от неправильной полярности и повышенного напряжения).

Многие производители выпускают специализированные микросхемы для работы в широком диапазоне питающих напряжений. Из новинок Maxim Integrated стоит отметить **MAX15062** [3] (максимальный ток нагрузки – до 300 мА), **MAX17501** [4] (до 500 мА), **MAX17502** [5] (до 1 А). Они работоспособны при входном напряжении в пределах 4,5...60 В, что идеально подходит для промышленных и автомобильных преобразователей с напряжением питания 12...36 В. На момент написания статьи эти чипы являлись самыми маленькими buck-конвертерами с интегрированными MOSFET-ключами (размер корпуса – всего 2x2 или 2x3 мм!) и единственными на рынке синхронными преобразователями в столь малом корпусе и со столь широким диапазоном питающего напряжения. Высокая рабочая частота вкпе с пиковым КПД выше 90% и ничтожным потреблением в режиме PFM на малых токах позволяет создать на базе этих чипов высокоэффективный преобразователь минимальных размеров. Микросхемы также могут похвастаться отличной защитой от короткого замыкания выхода – производителем заявлено неограниченное время нахождения в этом состоянии без ограничений по напряжению питания.

MAX17501 и ее более мощный аналог MAX17502 полностью совместимы по подключению внешних компонентов и типу корпуса (TDFN-10, размер корпуса 2x3 мм, рисунок 1), за исключением MAX17502H, выпускающейся только в корпусе TSSOP-14. Структурная схема микросхемы показана на рисунке 2, основные электрические параметры приведены в таблице 1. Из других особенностей микросхем следует отме-

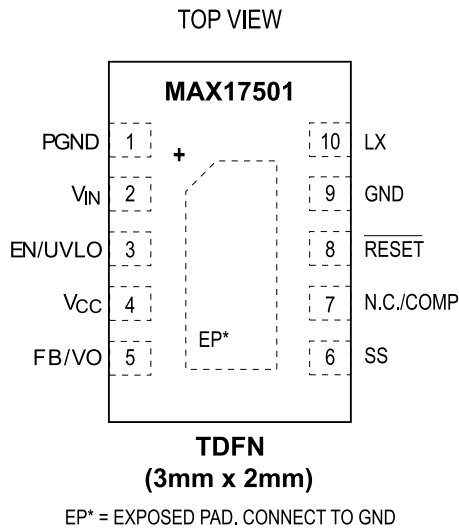


Рис. 1. Корпус MAX1501/MAX17502

тить р-канальный транзистор в верхней части полумоста — это избавило от необходимости использования бутстрепного конденсатора и позволило поднять коэффициент заполнения импульсов до максимума: максимальное выходное напряжение может достигать 92...96,5% от входного. Также у микросхем имеется маломощный линейный регулятор (напряжение 5 В, ток ограничения примерно 40 мА), выход которого подключен к ножке V_{CC}. Однако питать от этого источника внешние нагрузки следует с осторожностью — от него на кристалле запитаны внутренние блоки и драйвер нижнего транзистора, и при превышении тока возможна некорректная работа импульсного преобразователя. При входном напряжении менее 12 В потребляемый от этого источника ток не должен превышать 10 мА, при входном напряжении от 12 до 60 В — 2 мА.

Из других особенностей микросхем — программируемая с помощью одного внешнего конденсатора схема плавного старта soft-start, наличие встроенного супервизора питания с задержкой появления сигнала (выход RESET) и входа включения EN/UVLO с гистерезисом переключения. Микросхема способна корректно включиться, даже если на ее выходе внешним источником установлено ненулевое напряжение — при этом всегда верхний транзистор полумоста открывается первым (на землю выход не замыкается). При выключении преобразователя оба транзистора запираются, не замыкая выход, таким образом, преобразователь теоретически можно использовать для «умощнения» дежурного маломощного источника, не используя развязывающие диоды. Также микросхемы оснащены защитой от перегрева, срабатывающей при температуре 165°C, с гистерезисом переключения примерно 10 градусов.

Типовая схема включения чипов показана на рисунке 3. Схема справед-

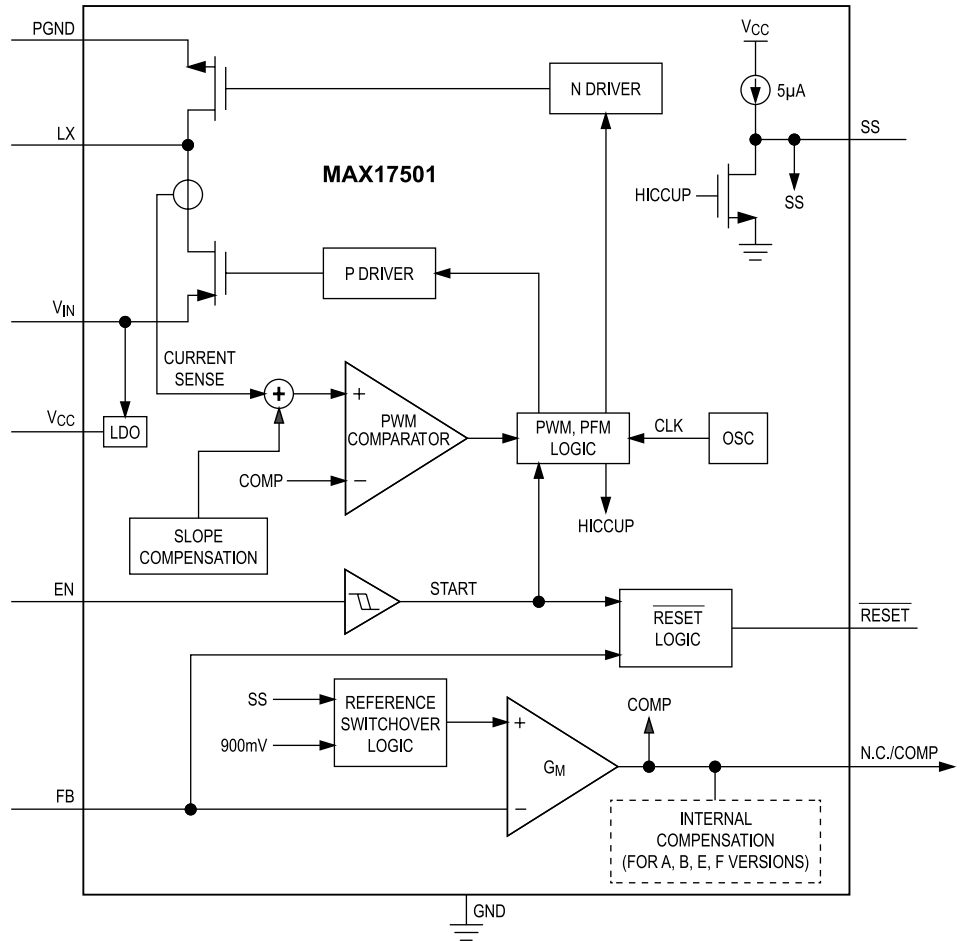


Рис. 2. Структурная схема MAX17501

лива для изделий с регулируемым выходным напряжением (индексы G и H), для остальных (рисунок 4) корректирующая цепочка на входе COMP не нужна — у них внутренняя коррекция, поэтому эту ножку нужно оставить неподключенной, а вход обратной связи FB/VO соединяется непосредственно с выходом преобразователя. Таким образом, для функционирования микросхем с фиксированным выходным напряжением достаточно всего пяти внешних компонентов — C1...C4 и L1 (причем в некоторых случаях C1 можно не устанавливать, об этом — далее), что делает микросхему действительно **простейшим преобразователем**, особенно по сравнению с прямыми конкурентами — им требуется минимум на 3...6 внешних компонентов больше, плюс необходим диод, часто занимающий гораздо больше места, чем сама микросхема. «Долой диоды Шоттки!»

Микросхемы MAX17501A и MAX17501B при величине тока нагрузки менее примерно 62,5 мА работают в режиме PFM («старт-стопный»), при превышении этого тока они автоматически переходят в режим PWM. В PFM максимальный ток через дроссель ограничен значением 125 мА, и генератор работает до тех пор, пока выходное напряжение не повысится до величины 103,3% от номинального значения, по-

сле чего он останавливается, ключи закрываются, и микросхема переходит в спящий режим с крайне малым потреблением. Генерация возобновится после того, как выходное напряжение просядет до величины 101,3% от номинального. Очевидно, что в этом режиме пульсации выходного напряжения чуть выше, чем в режиме PWM, однако режим PFM позволяет снизить потребляемый преобразователем ток в десятки раз, что критично для устройств с автономным питанием.

Минимальное входное напряжение преобразователя зависит от выходных напряжения и тока, сопротивления канала ключа и коэффициента заполнения и определяется по формуле:

$$V_{IN(MIN)} = \frac{V_{OUT} + (I_{OUT(MAX)} \times (R_{DCR} + 0,47))}{D_{MAX}} + (I_{OUT(MAX)} \times 0,73)$$

где $I_{OUT(MAX)}$ — максимальный ток нагрузки, R_{DCR} — активное сопротивление дросселя, D_{MAX} — максимальный коэффициент заполнения (равен 0,965 для микросхем с индексом H и 0,92 — для остальных). Максимальное входное напряжение зависит от выходного, частоты переключения $f_{SW(MAX)}$ (равна 320 кГц для микросхем с индексом H и 640 кГц — для остальных) и минимальной длительности открытого состояния верхнего ключа $t_{ON(MIN)}$ (макси-

Таблица 1. Основные электрические параметры линеек MAX15062, MAX17501/17502

Наименование	Тип корпуса	Выходное напряжение, В	Потребляемый ток, мА	Ток нагрузки (max), А	Рабочая частота, кГц	Режим работы
MAX15062AATA+	8 TDFN	3,3	2,5 (0,095*)	0,3	500	PFM/PWM
MAX15062BATA+	8 TDFN	5	2,5 (0,095*)	0,3	500	PFM/PWM
MAX17501AATB+	10 TDFN	3,3	4,75 (0,09*)	0,5	600	PFM/PWM
MAX17501BATB+	10 TDFN	5	4,75 (0,09*)	0,5	600	PFM/PWM
MAX17501EATB+	10 TDFN	3,3	4,75	0,5	600	PWM
MAX17501FATB+	10 TDFN	5	4,75	0,5	600	PWM
MAX17501GATB+	10 TDFN	Регулируемое**	4,75	0,5	600	PWM
MAX17501HATB+	10 TDFN	Регулируемое***	2,5	0,5	300	PWM
MAX17502EATB+	10 TDFN	3,3	4,75	1	600	PWM
MAX17502FATB+	10 TDFN	5	4,75	1	600	PWM
MAX17502GATB+	10 TDFN	Регулируемое**	4,75	1	600	PWM
MAX17502HATB+	14 TSSOP	Регулируемое***	2,5	1	300	PWM

* – Без нагрузки, в режиме PFM.

** – Диапазон регулирования от 0,9 В до $(0,92 \cdot V_{IN})$ В.

*** – Диапазон регулирования от 0,9 В до $(0,965 \cdot V_{IN})$ В.

мум 120 нс, типовое 75 нс), и не должно превышать, значения рассчитанного по формуле:

$$V_{IN(MAX)} = \frac{V_{OUT}}{f_{SW(MAX)} \times t_{ON(MIN)}} ,$$

иначе выходное напряжение будет завышено из-за ненулевого времени $t_{ON(MIN)}$.

Защита выхода от перегрузки по току у микросхем двухступенчатая: верхний транзистор отключается при значении протекающего через него тока более 0,76/1,65 А (у MAX17501/MAX17502, соответственно) но при этом работа преобразователя не нарушается, а при токе более 0,78/1,7 А срабатывает триггерная система защиты (*hiccup mode*), и оба ключевых транзистора запираются. Также триггер срабатывает после того, как выходное напряжение по каким-либо причинам просядет ниже 71% от заданного. После срабатывания триггера повторный старт произойдет только через 32768 тактов генератора, то есть примерно через 50...100 мс, и начнется с цикла soft-start.

Продолжительность цикла Soft-start зависит от емкости конденсатора C3, его емкость рассчитывается по формуле:

$$C_{SS} = 5,55 \times t_{SS}$$

где t_{SS} – длительность, мс, и C_{SS} – емкость C3, нф. Для программирования длительности цикла 600 мкс емкость конденсатора должна быть 3300 пф. Длительность цикла Soft-start выбирается такой, чтобы ток при старте ($C_{SEL} \times V_{OUT}/t_{SS}$) был менее 150/300 мА (MAX17501/MAX17502), здесь C_{SEL} – емкость конденсатора C4 и нагрузки преобразователя. Во время старта, пока выходное напряжение не превы-

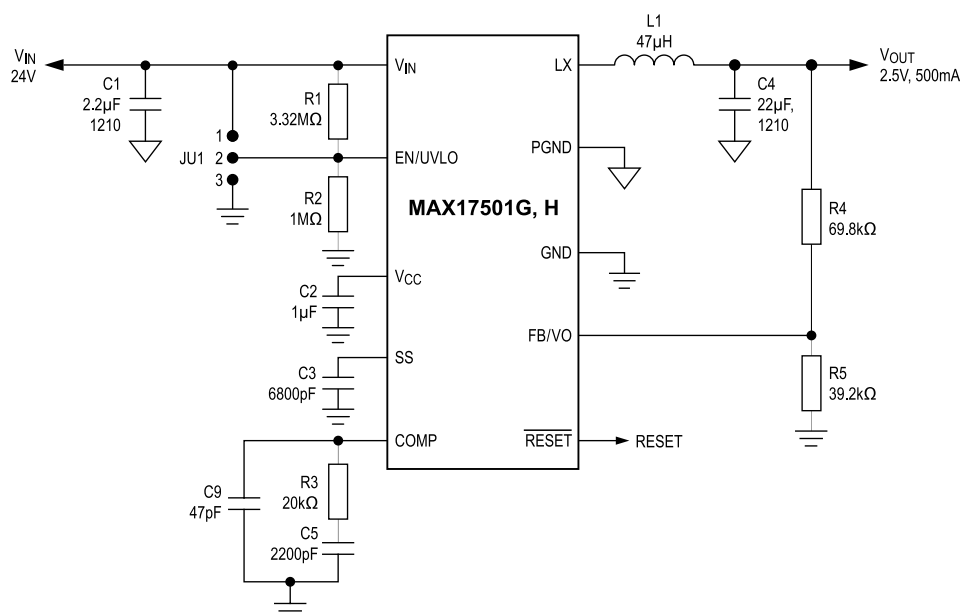


Рис. 3. Типовая схема включения MAX17501(G и H)

сило 71% от номинального, генератор 600 кГц версий (микросхемы с индексом A...G) работает на частоте 300 кГц.

Для расчета выходного напряжения у микросхем с индексами G и H рекомендуется выбрать параллельное сопротивление R_P (оно необходимо только для расчетов) менее 15 кОм (G) или менее 30 кОм (H), затем сопротивление R_4 определяется по формуле:

$$R_4 = \frac{R_p \times V_{OUT}}{0,9} ,$$

а сопротивление R_5

$$R_5 = \frac{R_4 \times 0,9}{(V_{OUT} - 0,9)} .$$

Выходное напряжение у микросхем с фиксированным напряжением мож-

но увеличить, добавив между выходом преобразователя и входом FB/VO резистор и подобрав его сопротивление, однако при этом могут возникнуть проблемы с внутренней коррекцией.

Вход включения EN/UVLO позволяет с помощью внешнего делителя на двух резисторах задавать любое пороговое напряжение включения преобразователя. Для простого включения вход EN/UVLO можно соединить непосредственно с входом питания преобразователя V_{IN} , или управлять им с помощью внешнего контроллера (напряжение для включения может быть любым в диапазоне от 1,25 В до V_{IN} , ток не более 200 нА). В выключенном состоянии потребляемый микросхемой ток не превышает 1 мкА. Сопротивление резистора R_1 рекомендуется выбрать равным 3,3 МОм, тогда со-

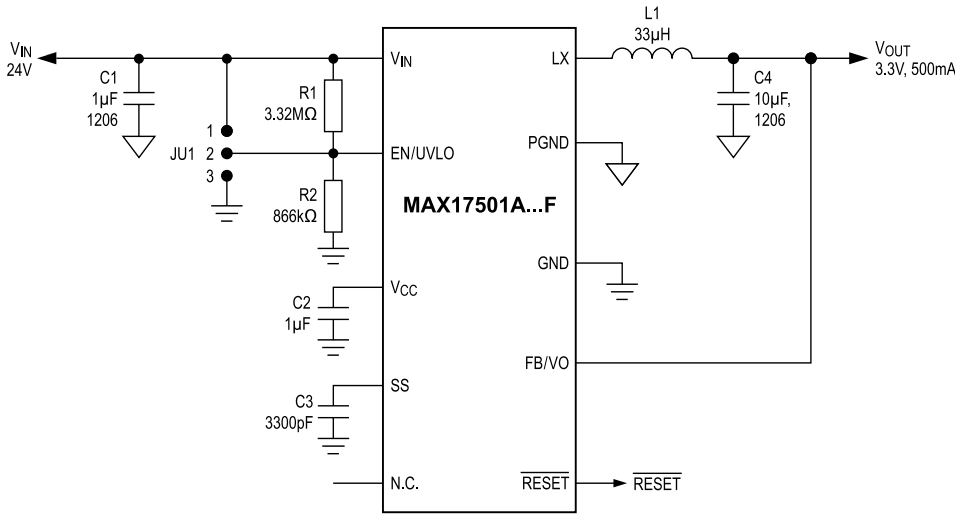


Рис. 4. Типовая схема включения MAX17501 (A...F)

противление R2 рассчитывается по формуле:

$$R_2 = \frac{R_1 \times 1,218}{(V_{INU} - 1,218)},$$

где V_{INU} — минимальное напряжение, при котором должен включаться преобразователь. Для микросхем с регулируемым выходным напряжением, V_{INU} должно быть больше $0,8 \times V_{OUT}$.

Выход RESET выполнен по схеме с открытым коллектором, напряжение на нем не должно превышать 6 В, а ток — 2 мА. Как только выходное напряжение достигнет значения 95,5% от номинального и пройдет 1024 тактов генератора, на этом выходе установится уровень логической единицы. При снижении выходного напряжения до 92,5% от номинального на выходе RESET установится уровень логического нуля, без задержки. Этот выход можно подключать непосредственно ко входу RESET микроконтроллера с инверсной логикой работы, добавив при необходимости «подтягивающий» резистор к шине питания микроконтроллера.

Благодаря высокой рабочей частоте, минимальная емкость входного конденсатора C1 может быть от 2,2 мкФ и больше, а при низком импедансе источника питания и малой длине соединительных проводов его можно вообще не устанавливать. Если длина проводов от источника питания довольно значительная, то рекомендуется зашунтировать C1 электролитическим конденсатором большой емкости. Минимальная емкость выходного конденсатора C4 должна быть от 22 мкФ для напряжения 3,3 В или от 10 мкФ для 5 В. Оба конденсатора C1 и C4 рекомендуется использовать с диэлектриком типа X7R. Индуктивность дросселя L1 должна быть не меньше значения, рассчитанного по формуле:

$$L_1 = \frac{V_{OUT} \times (V_{IN} - V_{OUT})}{0,15 \times V_{IN} \times f_{SW}},$$

причем отношение $(V_{OUT} / (L_1 \times f_{SW}))$ должно лежать для MAX17501 в диапазоне 150...250 мА, а для MAX17502 — в диапазоне 300...500 мА. Ток насыщения дросселя должен превышать максимальный ток через ключ (0,76/1,65 А для MAX17501/MAX17502).

Микросхемы работают на довольно высокой частоте, поэтому для надежной работы преобразователя при трассировке нужно соблюдать следующие правила:

- Все дорожки, по которым течет пульсирующий ток, должны быть минимальной длины и максимально широкими, по возможности не образуя паразитных петель;
- Земляные выводы конденсаторов C1, C4 и вывод PGND микросхемы должны соединяться в одной точке на минимальных расстояниях друг от друга и от входа/выхода преобразователя. Конденсатор C2 должен быть как можно ближе к выводам VCC и PGND;
- Аналоговая GND и силовая PGND земли должны соединяться в одной точке, где пульсации тока минимальны (оптимально — возле конденсатора C2) и занимать максимальную площадь на нижнем слое двухслойной платы;
- Элементы внешней компенсации и обратной связи, а также дорожки к ним должны быть как можно дальше от дросселя и дорожек, по которым течет пульсирующий ток;
- Для надежного отвода тепла от кристалла микросхемы на нижний слой платы под днищем микросхемы необходимо предусмотреть несколько металлизированных отверстий.

При разработке нового устройства можно воспользоваться онлайн- или оффлайн-калькулятором EE-Sim [6],

для доступа к которому необходимо зарегистрироваться на сайте. Приложение после ввода исходных данных автоматически рассчитывает номиналы внешних компонентов, строит основные графики и подбирает компоненты для заказа. К сожалению, на момент написания статьи в базе приложения была только микросхема MAX15062.

Для быстрого ознакомления с возможностями микросхем MAX15062, MAX17501 или MAX17502 компания Maxim Integrated предлагает отладочные платы на базе любой микросхемы из этих серий (например, плата MAX17501ATEVKIT на базе MAX17501AATB+). Плата представляет собой полностью законченное изделие эталонного дизайна, и для запуска преобразователя достаточно только подключить нагрузку и подать питание. Некоторые платы доступны для заказа со склада КОМПЭЛ.

Литература

1. ГОСТ Р 51317.6.1-2006. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых в жилых, коммерческих зонах и производственных зонах с малым энергопотреблением. Требования и методы испытаний. <http://standartgost.ru/ГОСТ Р 51317.6.1-2006>
2. ГОСТ 28751-90. Электрооборудование автомобилей. Электромагнитная совместимость. Кондуктивные помехи по цепям питания. Требования и методы испытаний. <http://standartgost.ru/ГОСТ 28751-90>
3. Андрей Самоделов. Средства первой необходимости: защита цепей питания и других элементов схем на базе решений ST//Новости электроники, №2, 2013.
4. Artur Seibt. Отрицательное входное сопротивление и входной ток//ЭК. Силовая электроника, №1, 2013.
5. MAX16126/MAX16127: Load-Dump/Reverse-Voltage Protection Circuits <http://www.maximintegrated.com/datasheet/index.mvp/id/7394>
6. MAX17501: 60V, 500mA, Ultra-Small, High-Efficiency, Synchronous Step-Down DC-DC Converter <http://www.maximintegrated.com/datasheet/index.mvp/id/7554>
7. MAX17502: 60V, 500mA, Ultra-Small, High-Efficiency, Synchronous Step-Down DC-DC Converter <http://www.maximintegrated.com/datasheet/index.mvp/id/7556>

Получение технической информации, заказ образцов, поставка — e-mail: analog.vesti@compel.ru

Роман Иванов (г. Санкт-Петербург)

ВСЕ ДЛЯ РАБОТЫ С ТОКОВОЙ ПЕТЛЕЙ ОТ MAXIM INTEGRATED



Токковая петля – один из старейших интерфейсов, до сих пор остающихся актуальными. Огромная номенклатура **операционных усилителей, ЦАП и АЦП**, выпускаемая компанией **Maxim Integrated**, позволяет построить **передатчик и приемник токовой петли практически для любых условий**.

Интерфейс передачи информации «токковая петля» основан на изменении силы электрического тока, протекающего в цепи, связывающей приемник и передатчик. Его история своими корнями уходит в пятидесятые годы. Первоначально в нем использовался ток до 60 мА, но довольно быстро ток понизили до 20 мА.

Несмотря на появление большого количества новых интерфейсов, старая добрая токовая петля и по сей день активно применяется в разнообразном технологическом оборудовании, датчиках и исполнительных устройствах.

В данной статье мы остановимся на реализации интерфейса токовой петли на элементной базе компании **Maxim Integrated** – общепризнанного лидера в производстве интегральных схем для работы с аналоговыми и цифровыми сигналами.

Аналоговая токовая петля

По виду передаваемой информации токовая петля делится на аналоговую и цифровую. В цифровой токовой петле уровнем тока передается всего два состояния – логический ноль либо логическая единица. Аналоговая токовая петля гораздо интереснее в этом плане – уровнем тока транслируется весь диапазон значений передаваемой величины, поэтому построение такой петли гораздо сложнее и требует больше времени. В данной статье мы рассмотрим основные аспекты реализации интерфейса аналоговой токовой петли на примере конкретных схемотехнических решений.

Как уже упоминалось, в токовой петле для передачи данных используется ток, а не напряжение. Это и является основным преимуществом данного интерфейса, поскольку ток, вытекающий из источника тока, проходя по длинным

кабельным линиям, практически не изменяет свое значение. Потерями тока из-за утечек кабеля можно пренебречь. К тому же, токовая петля довольно устойчива к помехам. Эти обстоятельства позволяют связывать два устройства по токовой петле на расстоянии нескольких километров. Немаловажным плюсом является использование всего двух проводов, по которым, кроме передачи данных, можно еще и запитывать устройства.

Как и в большинстве интерфейсов, в токовой петле можно выделить три составляющие: передатчик, приемник и защиту линии (рисунок 1).

Передатчик осуществляет преобразование данных, полученных от датчика (в цифровой или аналоговой форме), в соответствующий им ток 0 (4)...20 мА для его дальнейшей передачи по линии связи. Приемник, соответственно, осуществляет обратное преобразование.

Вариантов реализации данных задач довольно много и конкретное решение зависит от типа датчика, требований точности, параметров линии передачи и конечной стоимости решения.

Для защиты передатчика от нештатных ситуаций можно включить в линию передачи схему защиты.

Рассмотрим конкретные варианты реализации токовой петли на элементной базе Maxim.

Передача сигнала токовой петли

Начнем с построения передатчиков. Рассмотрим несколько схемотехнических решений для передачи сигнала токовой петли.

ЦАП с токовым выходом MAX5661

Одним из несложных решений для построения передатчика токовой петли является использование однокристового преобразователя с токовым выходом MAX5661, программируемого по интерфейсу SPI.

Микросхема **MAX5661** предоставляет разработчику все необходимые инструменты для разработки приложений, работающих с токовыми и потенциальными выходными сигналами.

Выходные усилители обеспечивают выходное напряжение в стандартном промышленном диапазоне ± 10 В или выходной ток 0 (4)...20 мА. Потенциальный выход (OUTV) рассчитан на резистивную нагрузку более 2 кОм и емкостную – до 1,2 мкФ.

Токковый выход (OUTI) при работе на резистивную нагрузку выдает напряжение до 37,5 В, а также работает на индуктивную нагрузку до 1 Гн. При работе микросхемы активным может быть только один выход.

MAX5661 выпускается в 64-выводном корпусе LQFP с габаритными размерами 10x10 мм и работает в рас-

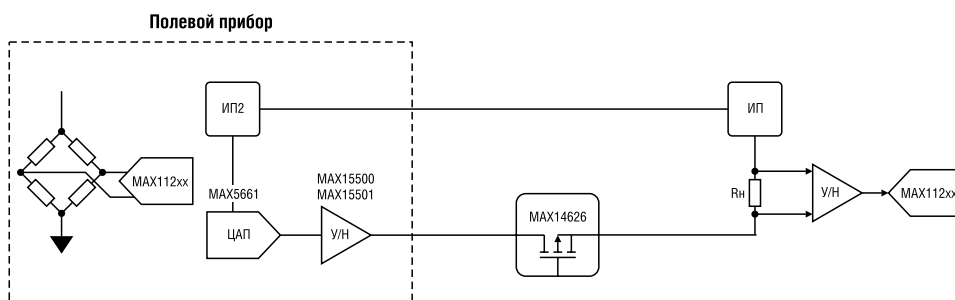


Рис. 1. Схема реализации токовой петли

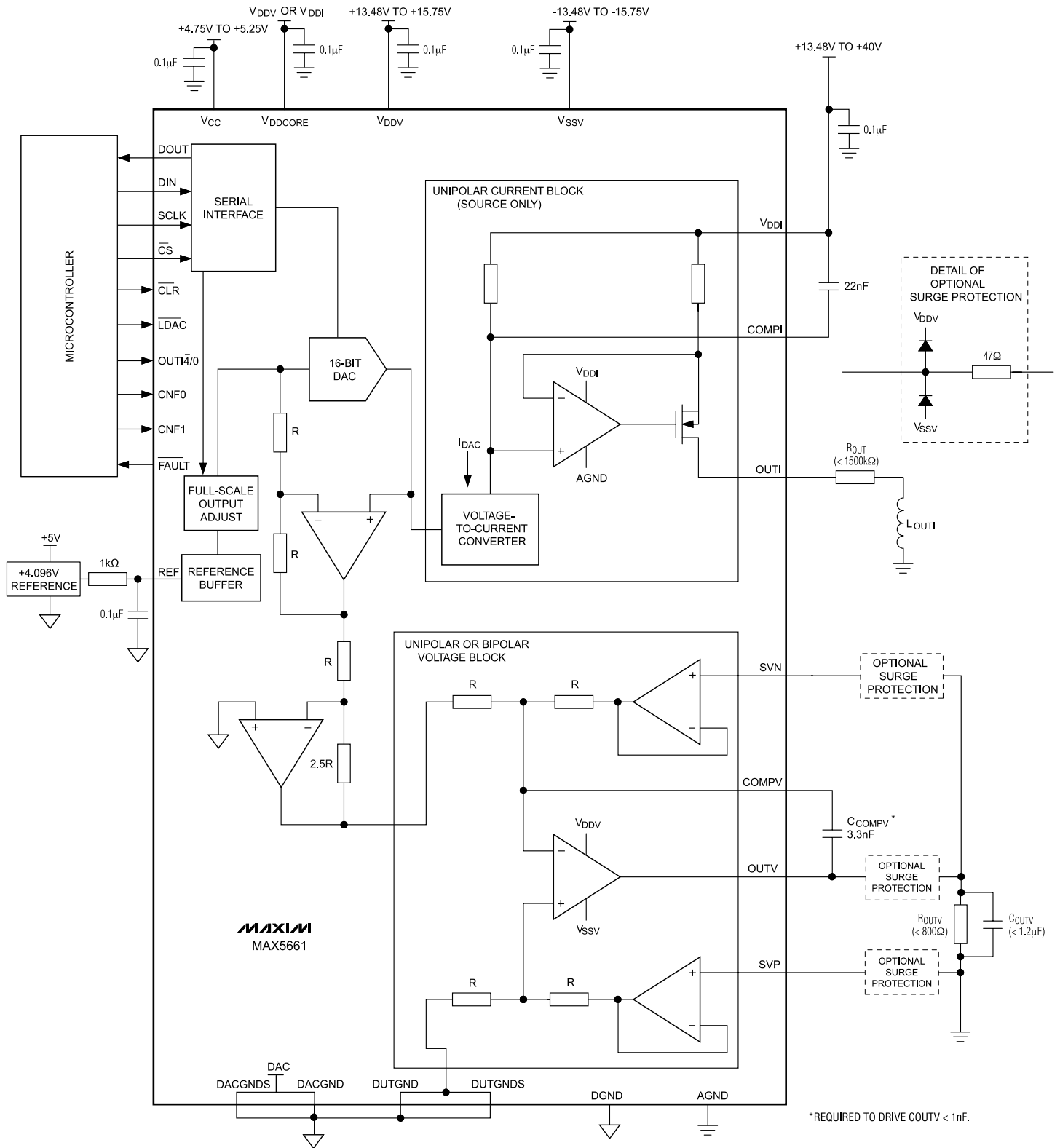


Рис. 2. Типовая схема включения MAX5661

ширном температурном диапазоне -40...105°C.

Для подключения преобразователя к микроконтроллеру используется 4-проводной SPI-совместимый последовательный интерфейс. MAX5661 выступает в качестве ведомого и поддерживает скорость передачи данных до 10 Мбит/с.

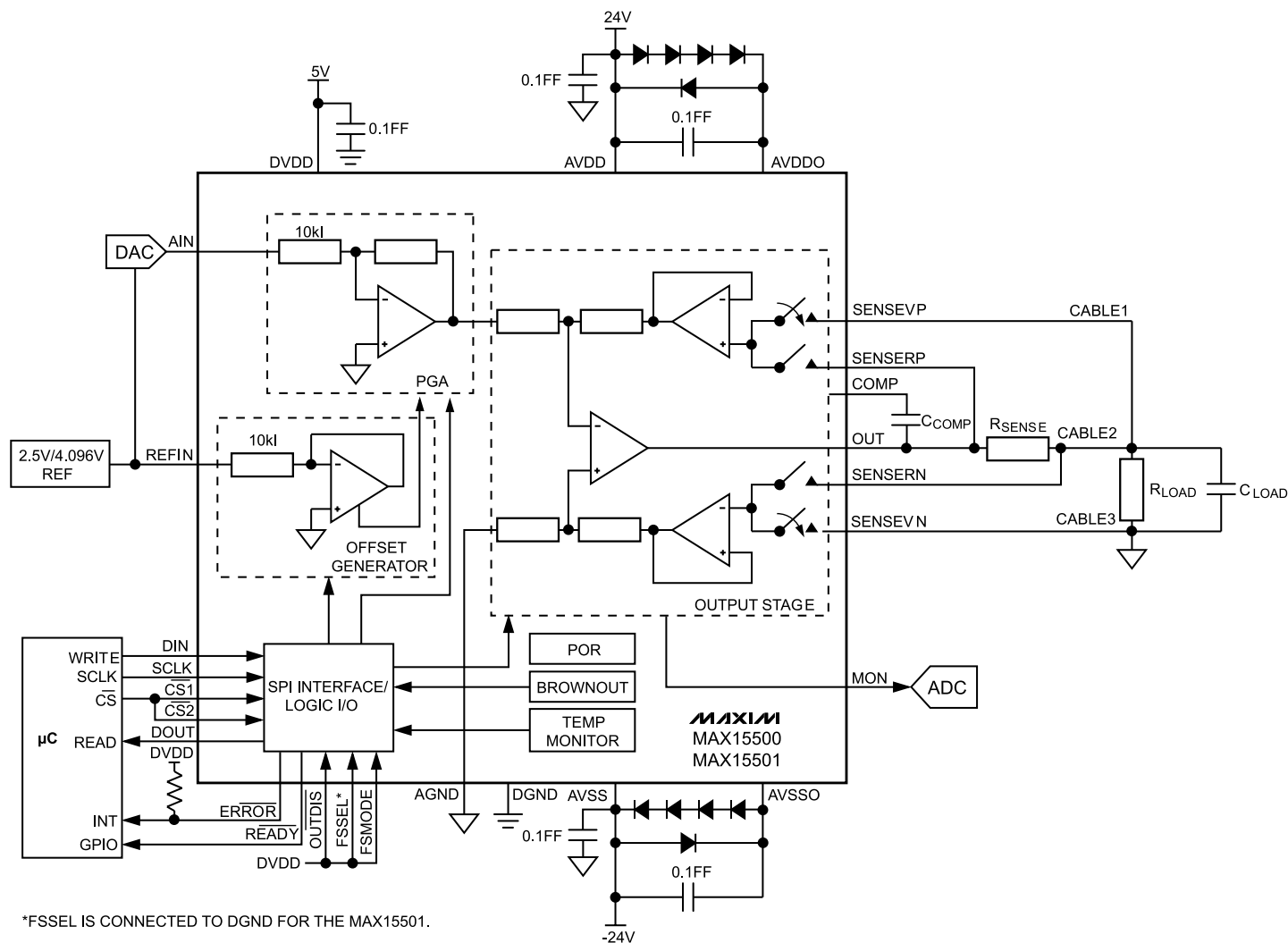
При классическом подключении по SPI-шине нескольких устройств сигналы ввода данных (DIN), вывода дан-

ных (DOUT) и тактирующие сигналы (SCLK) подключаются параллельно, а обращение к конкретной микросхеме задается линией выбора чипа (CS). Такая схема построения достаточно легко реализуема, когда количество ведомых устройств в системе не очень велико.

Микросхема MAX5661 позволяет реализовать, в дополнение к классическому подходу соединения, альтернативный метод последовательного

подключения (Daisy chain). При последовательном подключении запараллеливаются сигналы SCLK и CS, а DIN проходит через микросхему и с выхода (DOUT) поступает на вход следующей. Это позволяет снизить количество линий CS и DIN, экономя место на плате и ресурсы управляющего микроконтроллера.

На рисунке 2 представлена стандартная схема включения MAX5661.



*FSSEL IS CONNECTED TO DGND FOR THE MAX15501.

Рис. 3. Типовая схема включения MAX15500/15501

Формирователи токового выхода MAX15500/15501

Другим простым решением для построения передатчика токовой петли является использование формирователя аналоговых выходных сигналов с токовым выходом **MAX15500/15501**.

Микросхемы обеспечивают программируемый выходной ток до ± 24 мА и напряжение до ± 12 В, пропорциональное управляющему сигналу. В качестве такого сигнала выступает напряжение, которое обычно подается с внешнего ЦАП в диапазоне 0...4,096 В для MAX15500 и в диапазоне 0...2,5 В для MAX15501. Выходные сигналы тока и напряжения могут быть как биполярными, так и униполярными.

Выходы MAX15500/MAX15501 имеют защиту от перегрузки по току и короткого замыкания в нагрузке, а также схему защиты по ценам питания до ± 35 В. Чип имеет встроенные мониторы температуры и питания для защиты от перегрева и провалов напряжения с программируемым предельным значением напряжения источника питания.

Для задания режимов работы микросхем имеется SPI-интерфейс с под-

держкой последовательного включения. В дополнение к SPI у микросхем имеется один выход с открытым коллектором для передачи сигнала прерывания.

MAX15500/MAX15501 работают в расширенном температурном диапазоне $-40...105^{\circ}\text{C}$ и выпускаются в 32-контактном корпусе TQFN размером 5x5 мм.

На рисунке 3 представлена стандартная схема включения MAX15500/15501.

Операционные усилители в качестве формирователя токового выхода

И последним рассмотренным способом построения передатчика токовой петли является использование операционных усилителей. Данный вариант является самым трудоемким, но дает достаточно гибкие решения, ограниченные только фантазией разработчика.

За основу возьмем операционный усилитель **MAX9943**.

MAX9943 представляет собой высоковольтный операционный усилитель, обеспечивающий высокую точность, низкий уровень температурного дрейфа и низкое потребление энергии. Усили-

тель работает от однополярного источника питания номиналом 6...38 В или двухполярного источника питания номиналом $\pm 3... \pm 19$ В. MAX9943 идеально подходит для применения в системах формирования сигналов датчиков, высокопроизводительных промышленных измерительных системах и системах с питанием от контура (передатчики с током 4...20 мА).

Усилитель выпускается в 6-выводном компактном корпусе TDFN или 8-выводном корпусе μMAX и рассчитан на работу в расширенном температурном диапазоне $-40...125^{\circ}\text{C}$.

На рисунке 4 представлена стандартная схема реализации преобразователя напряжения в ток с использованием операционного усилителя MAX9943.

Связь между входным напряжением и током нагрузки описывается выражением:

$$V_{IN} = (R_2/R_1) \times R_{SENSE} \times I_{LOAD} + V_{REF}$$

Сопротивление нагрузки R_{LOAD} может достигать нескольких кОм. Номинал резистора R_{SENSE} выбирается небольшим — несколько десятков Ом.

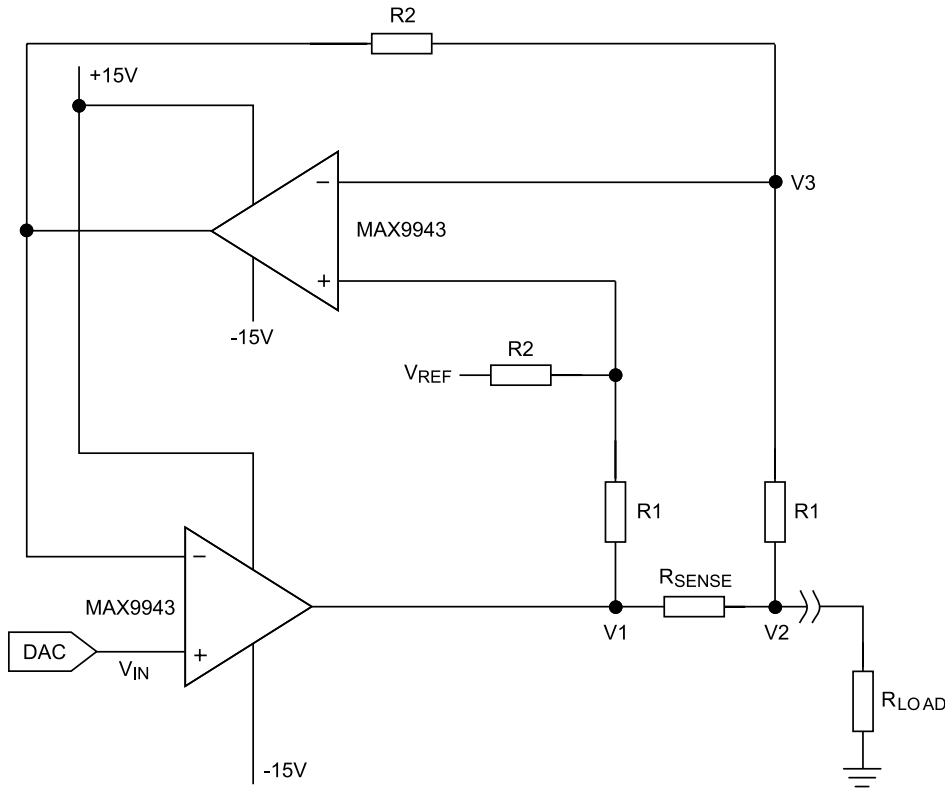


Рис. 4. Преобразователь напряжения в ток на основе MAX9943

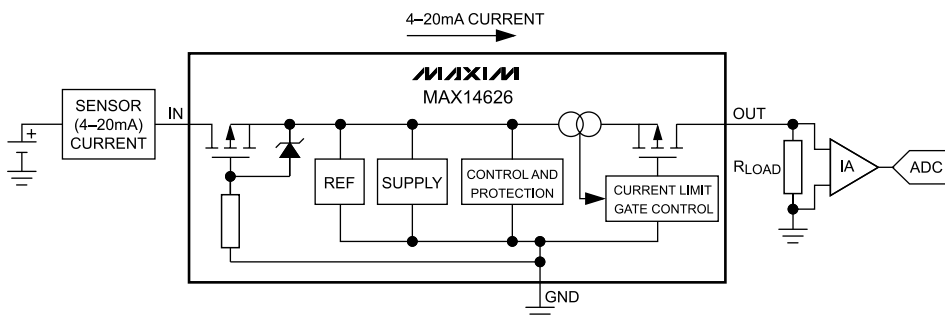


Рис. 5. MAX14626

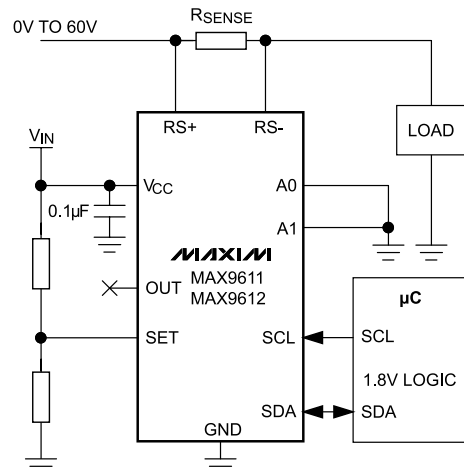


Рис. 6. Типовая схема включения MAX9611/MAX9612

Подробное описание данного решения с расчетами и графиками можно найти в «APPLICATION NOTE 4394» на сайте Maxim.

Ограничитель тока MAX14626 для защиты токовой петли

Для защиты токовой петли 4...20 мА от нештатных ситуаций компания Maxim предлагает специализированную микросхему защиты **MAX14626** (рисунок 5). В основе чипа лежит токоограничивающий ключ, имеющий сопротивление в открытом состоянии 25 Ом и работающий в диапазоне входных напряжений 2,3...36 В.

Ограничение по току составляет 30 мА, что делает MAX14626 идеальной для применения в качестве защиты мо-

дулей ввода аналоговых сигналов с датчиков. Определение перегрузки по току происходит в непрерывном режиме.

К дополнительным защитным функциям микросхемы относятся отключение при перегреве и блокировка обратного включения для защиты от неправильного включения.

MAX14626 доступна в миниатюрном TDFN-корпусе с шестью выводами размером 3x3 мм и рассчитана на работу в промышленном температурном диапазоне -40...85°C.

Прием сигнала токовой петли

Теперь пора рассмотреть несколько схемотехнических решений для приема сигнала аналоговой токовой петли.

Токоизмерительные усилители MAX9611 и MAX9612

MAX9611 и **MAX9612** — это высоковольтные токоизмерительные усилители со встроенным блоком усиления, которые могут быть использованы в режиме операционного усилителя или компаратора с возможностью дальнейшей оцифровки аналогового сигнала на 12-разрядном АЦП.

Широкий диапазон входных напряжений 0...60 В более чем достаточен для работы с токовыми петлями, а программируемый размах измеряемого дифференциального напряжения (440, 110 и 55 мВ) позволяют достичь достаточно точного измерения входного тока путем подбора необходимого шунтового резистора.

Преобразованный в напряжение ток оцифровывается встроенным 12-разрядным АЦП, управляемым по I²C-интерфейсу. Скорость преобразования составляет до 500 выб/сек.

Весьма интересна адресация к микросхеме: адресных битов всего два, но они позволяют подключать до 16 чипов на одной шине. Весь секрет кроется в том, что на адресные входы подаются не только напряжения питания и ноль, но еще 1/3 и 2/3 от уровня питания.

Шина I²C совместима с логическими уровнями 1,8 В и 3,3 В, что позволяет подключать микросхему к большинству современных микроконтроллеров.

Для питания потребуется источник с выходным напряжением 2,7...5,5 В.

Встроенный температурный сенсор позволяет измерять температуру кристалла во всем рабочем диапазоне с точностью до 0,48°C.

Микросхемы рассчитаны на работу в расширенном температурном диапазоне -40...125°C и выпускаются в небольшом 10-выводном µMAX®-корпусе размером 3x5 мм.

Отличие MAX9611 от MAX9612 — в том, что первая включается по неинвертирующей схеме, а вторая — по инвертирующей.

Доступны отладочные средства — **MAX9611EVKIT**.

Типичная схема включения представлена на рисунке 6.

Токоизмерительный усилитель MAX9938

MAX9938 — прецизионный усилитель со встроенным блоком усиления, предназначенный для контроля тока. В отличие от MAX9611/ MAX9612, он не содержит встроенного АЦП, а имеет потенциальный выход, поэтому требуется дополнительное АЦП. С одной стороны, это увеличивает количество элементов и конечную стоимость решения, а с другой — дает возможность разработчику выбрать необходимый ему преобразователь.

Усилитель имеет небольшое входное напряжение смещения, составляющее не более 500 мкВ, а разброс коэффициента передачи лежит в пределах 0,5%.

Собственное потребление очень мало и составляет порядка 1 мкА.

Усилитель рассчитан на работу с синфазными напряжениями на входах в пределах 1,6...28 В.

Выпускается три версии усилителя с различным коэффициентом передачи: 25 В/В (**MAX9938T**), 50 В/В (**MAX9938F**) и 100 В/В (**MAX9938H**). Возможность выбора коэффициента передачи дает определенную свободу в выборе внешнего токоизмерительного резистора.

MAX9938 выпускается в крошечном корпусе UCSP с размерами 1x1 мм, либо в 5-выводном корпусе SOT23, и рассчитан на работу в пределах температурного диапазона -40...85°C.

Типичная схема включения представлена на рисунке 7.

Дельта-сигма аналого-цифровой преобразователь MAX11205

MAX11205 — это 16-разрядный одноканальный дельта-сигма аналого-цифровой преобразователь с ультранизким энергопотреблением (максимальный ток в активном режиме <300 мкА) и последовательным выходом.

Микросхема обеспечивает самое высокое соотношение разрядности к потребляемой мощности и оптимизирована для построения решений, требующих сочетания широкого динамического диапазона и низкого энергопотребления.

АЦП содержит встроенный высокоточный тактовый генератор, который не требует подключения дополнительных внешних элементов.

MAX11205 обеспечивает связь по простому двухпроводному последовательному интерфейсу и выпускается в небольшом 10-выводном корпусе μMAX. Диапазон рабочих температур составляет -40...85°C.

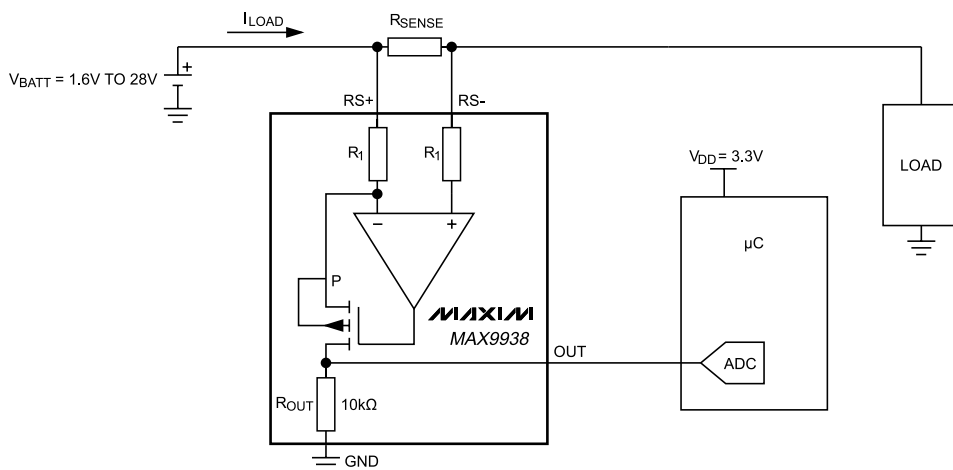


Рис. 7. Типовая схема включения MAX9938

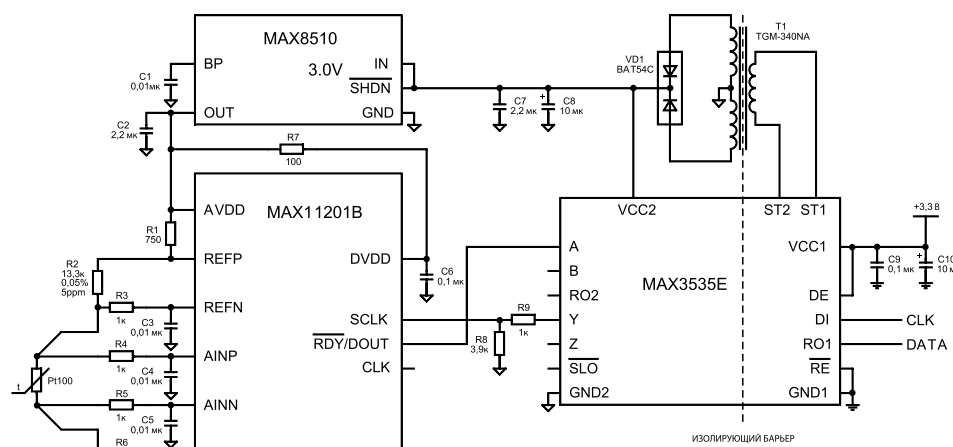


Рис. 8. Гальванически изолированный прецизионный измеритель сигнала токовой петли

На рисунке 8 представлена схема построения гальванически изолированного прецизионного измерителя сигнала токовой петли на основе MAX11205 [1].

В качестве токового шунта используется прецизионный резистор R1, напряжение с которого оцифровывается на MAX11205. Для гальванической развязки линии данных и напряжения питания используется микросхема **MAX3535E**, а для стабилизации изолированного напряжения питания и генерации опорного напряжения — **MAX6033A30**.

Операционные усилители в качестве токового входа

Так же, как и в случае передатчиков токовой петли, построение приемников токовой петли на основе операционных усилителей является самым трудоемким, но максимально гибким.

За основу схемы возьмем операционный усилитель **MAX44250**.

MAX44250 — одноканальный прецизионный малошумящий операционный усилитель с широким диапазоном питающих напряжений. Отличитель-

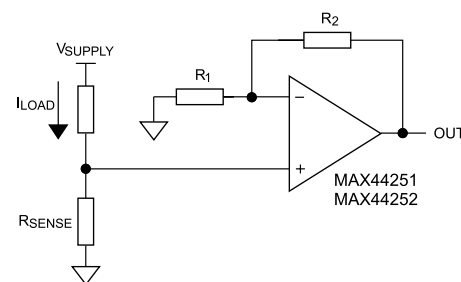


Рис. 9. Преобразователь тока в напряжение на основе MAX44250

ными особенностями данного семейства являются низкие значения входного шума (5,9 нВ/√Гц), напряжения смещения (6 мкВ) и температурного дрейфа 19 нВ/°C (макс).

Такие высокие метрологические характеристики делают этот усилитель идеальным для применения в измерительных трактах.

MAX44250 работает в диапазоне температур -40...125°C и выпускается в 5-пиновом SOT23 или 8-пиновом μMAX.

На рисунке 9 представлена стандартная схема реализации преобразователя

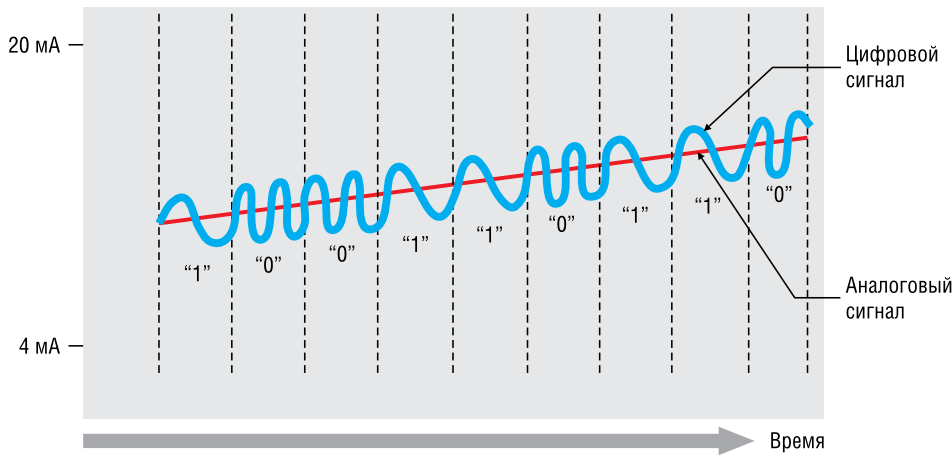


Рис. 10. HART-протокол

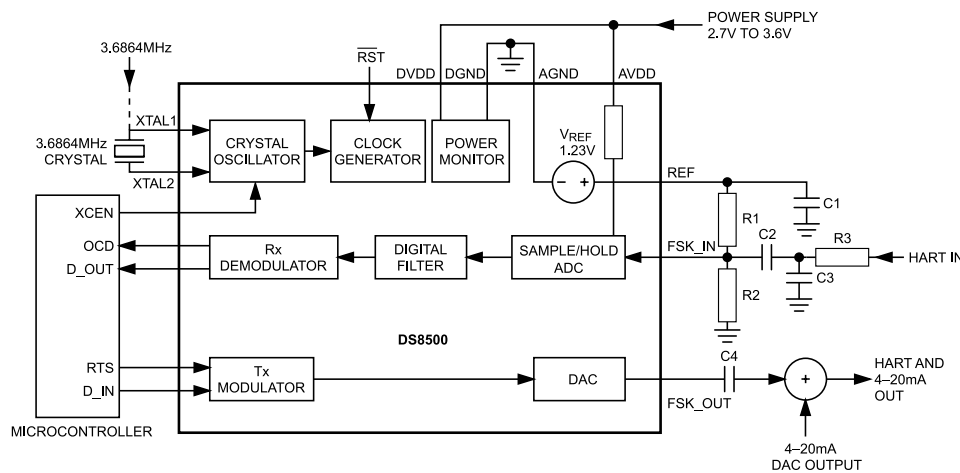


Рис. 11. Типовая схема включения DS8500

тока в напряжение с использованием операционного усилителя MAX44250.

Связь между входным током I_{LOAD} и напряжением на выходе V_{OUT} описывается следующим выражением:

$$V_{OUT} = (I_{LOAD} \times R_{SENSE}) \times (1 + R_2/R_1).$$

Сопротивление R_{SENSE} выступает в качестве токового шунта и, благодаря изменяемому с помощью резисторов R_2/R_1 коэффициенту усиления, его можно менять в достаточно большом диапазоне. При необходимости его можно уменьшать до нескольких Ом.

Выход операционного усилителя подключается, как правило, к АЦП.

HART-протокол

HART-протокол (*Highway Addressable Remote Transducer Protocol*) –



Рис. 12. Cupertino (MAXREFDES5#)

но просто разделяются фильтрами приемника и проходят независимую обработку.

HART-модем DS8500

Для реализации HART протокола компания Maxim предлагает однокристальное решение – модем **DS8500**.

Чип содержит встроенные модулятор и демодулятор сигнала 1200/2200 Гц, имеет очень низкое энергопотребление и, благодаря интегрированной цифровой сигнальной обработке, требует незначительной внешней обвязки. Входной сигнал проходит семплирование на АЦП и поступает на цифровой фильтр/демодулятор. Такая конструкция модема позволяет уверенно обнаруживать сигнал даже в зашумленной среде. Выходной ЦАП генерирует синусоидальное напряжение и сохраняет сдвиг фаз при переключении частот 1200 и 2200 Гц. Низкое энергопотребление достигается за счет отключения схем приемника во время передачи сигнала и наоборот (при приеме не работает передатчик). Все это делает DS8500 идеальным решением для создания малопотребляющих передатчиков систем управления технологическими процессами.

Микросхема выпускается в миниатюрном 20-выводном корпусе TQFN 5x5x0,8 мм и рассчитана на работу в промышленном температурном диапазоне -40...85°C.

На рисунке 11 представлена типовая схема применения DS8500.

Поскольку в чип интегрирован цифровой фильтр, то снаружи необходим только простой пассивный RC-фильтр. На резисторе R3 и конденсаторе C3 реализован фильтр нижних частот с частотой среза 10 кГц. C2 и R2/R1 образуют фильтр верхних частот с частотой среза 480 Гц. Резисторный делитель, образованный R1 и R2, обеспечивает смещение входного напряжения $V_{ref}/2$ ($R1 = R2$) на входе АЦП. Конденсатор C4 обеспечивает развязку синусоидального сигнала с выхода ЦАП DS8500 и аналоговой токовой петли. Емкость C4 обычно выбирается не менее 20 нФ.

Средства отладки

Компания Maxim предлагает несколько аналоговых модулей для изучения токовой петли.

Cupertino (MAXREFDES5#)

MAXREFDES5# (рисунок 12) – это универсальный аналоговый модуль компании Maxim для работы с аналоговыми сигналами в диапазоне ±10 В и токовой петлей 4...20 мА. Плата имеет гальванически изолированную систему питания и обеспечивает гальваническую развязку сигналов данных.



Рис. 13. Campbell (MAXREFDES4#)

В основе Supertino лежит малопотребляющий 16-разрядный АЦП последовательного приближения **MAX1301**, осуществляющий преобразование аналоговых сигналов и передачу полученных результатов по SPI-шине. Для буферизации аналоговых сигналов установлены операционные усилители **MAX9632**. Гальваническая развязка обеспечивается цифровым изолятором **MAX14850** и драйвером трансформатора **MAX256**.

Supertino выполнен в виде отдельного модуля, что позволяет использовать его в микропроцессорных системах собственной разработки как готовое устройство.

Для оценки возможностей можно использовать отладочные платы Nexys 3 или ZedBoard™, выполненные на основе довольно мощных ПЛИС. MAXREFDES5#

подключается к этим платам в качестве дополнительного модуля.

Campbell (MAXREFDES4#)

MAXREFDES4# (рисунок 13) — это законченное решение для работы с аналоговыми сигналами в диапазоне 0,2...4,096 В или токовой петлей 4...20 мА. Плата обеспечивает гальваническую изоляцию питания и сигналов данных.

В основе Campbell лежат высокоточный 16-разрядный АЦП **MAX11100** и прецизионный малопотребляющий операционный усилитель **MAX44250**. Решение выполнено в виде отдельного модуля, что позволяет использовать его самостоятельно в своих разработках.

Для знакомства также подойдут отладочные платы Nexys 3 или ZedBoard.

Заключение

Компания Maxim имеет в своем арсенале все необходимое для организации передачи информации по токовой петле. Выбор операционных усилителей, ЦАП и АЦП поистине колоссален и может удовлетворить практически любые требования разработчиков. Имея в своем распоряжении такую элементную базу, можно создать как самое простое и недорогое решение, так и сложный многофункциональный комплекс с уникальными возможностями.

Все изложенные в данной статье схемотехнические решения не следует воспринимать как догму. Аналоговая электроника очень сложна и не имеет универсальных решений. Набор элементов всегда уникален для каждого конкретного случая.

Литература

1. Андрусевич А. «Сигма-дельта АЦП компании MAXIM», Электронные компоненты №12, 2010.

Получение технической информации,
заказ образцов, поставка –
e-mail: analog.vesti@compel.ru



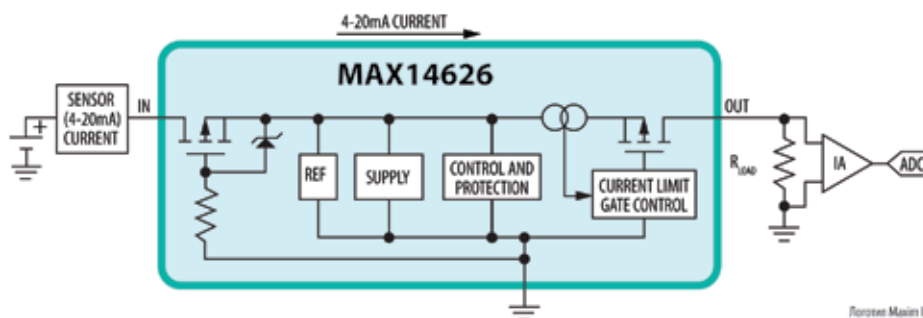
MAX14626 – защита токовой петли 4–20 мА

Отличительные особенности

- Точность 10%
- Потребление (max) 50 мкА
- Сопротивление канала ~25 Ом
- Напряжение питания: 2,3...40 В
- Защита от перегрева
- Защита от переплюсовки
- Корпус 3 x 3 мм TDFN

Применения

- Промышленные системы
- Системы контроля
- Системы с аналоговыми датчиками



©2008 Maxim Integrated – торговая марка Maxim Integrated Products, Inc.

Москва
Тел.: (495) 234-7764, доб. 2328
Соколов Андрей
E-mail: a.sokolov@compel.ru

Санкт-Петербург
Тел.: (812) 327-9403, доб. 4219
Червинский Михаил
E-mail: cmv.spb@compel.ru

Компэл
www.compel.ru

Вячеслав Гавриков (г. Смоленск)

С ТЕХНОЛОГИЕЙ AUTO ZERO: НОВЫЕ ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ



Наряду с аналогово-цифровым преобразователем, усилитель является важным звеном измерительной цепочки. **Maxim Integrated** предлагает новые **прецизионные усилители**, построенные с использованием технологии «Auto Zero», усилители с автоматической калибровкой при включении, прецизионные усилители с расширенным диапазоном питающих напряжений.

Измерение физических величин является широко распространенной задачей. Роль первичных преобразователей физических величин выполняют датчики. Например, резистивные датчики температуры преобразуют температуру в удобную для электрических измерений величину — сопротивление.

Существует огромное количество датчиков — давления, температуры, освещенности — каждый из которых имеет свои особенности и области применения. Помимо непосредственно измерительной техники датчики используются в медицинской аппаратуре, промышленности (управление механизмами и двигателями), телекоммуникациях (ВОЛС), автомобилестроении.

Аналоговая техника замещается цифровой. Однако в любой цифровой измерительной технике есть аналоговая часть. Анализ погрешностей измерительного тракта является отправной точкой создания измерительных устройств.

Анализ погрешностей в сигнальной цепочке измерительного тракта

Измерительный тракт современной системы обработки сигналов включает в себя ряд звеньев (рисунок 1). Исходный сигнал, снимаемый с датчика (или датчиков), поступает на усилитель через мультиплексор или напрямую. Главная задача усилителя — нормирование/усиление сигнала до оптимального для АЦП уровня. АЦП оцифровывает сигнал в соответствии с уровнем напряжения источника опорного напряжения (ИОН). Далее сигнал проходит цифровую обработку в вычислительном модуле (процессор, микроконтроллер).

К сожалению, ни одно из звеньев измерительной цепи не является идеальным и вносит погрешность в результат

измерения. При этом погрешность имеет постоянную и шумовую составляющие.

Источником постоянной составляющей погрешности являются параметры, которые не зависят от времени либо имеют слабую временную зависимость. Так например, термосопротивление имеет начальный разброс точности номинала; усилитель имеет разброс коэффициента усиления за счет разброса номиналов пассивных компонентов и др; ИОН имеет ограниченную точность начальной установки напряжения; АЦП имеет погрешность смещения нуля, может иметь погрешность линейности и т.д.

Кроме того, большинство погрешностей постоянной составляющей все же имеют временную зависимость (например, номиналы пассивных компонентов «уплывают» со временем) и температурную зависимость, что значительно усложняет задачу измерений. Ведь проведя калибровку прибора для одной температурной точки, можно легко выйти за рамки точности при другой температуре. То же можно сказать и про время, со временем приборы теряют точность, и требуют периодической поверки.

Помимо постоянной составляющей, каждое звено вносит собственный шум в полезный сигнал. Одним из основных узлов, определяющих точность измерения, является усилитель. С одной сто-

роны погрешности датчиков, усиленные и преобразованные, с другой — погрешности усилителя оказывают дополнительное влияние на полезный сигнал, поступающий на АЦП.

Критерии выбора ОУ для прецизионных измерений

В настоящее время усилители, как правило, строятся на базе интегральных ОУ. К сожалению, идеального ОУ не существует. Зато существует огромное количество операционных усилителей для различных приложений и с различными характеристиками. Поэтому выбор может стать трудоемким монотонным процессом изучения документации на компоненты от множества компаний-производителей. Для облегчения труда инженеров-разработчиков измерительной аппаратуры лидеры электронной промышленности особо выделяют в своей номенклатуре прецизионные ОУ.

Основным критерием, которому должен удовлетворять прецизионный ОУ, является обеспечение требуемой точности измерений. Чтобы выбрать ОУ, в первую очередь необходимо оценить параметры, непосредственно влияющие на погрешность выходного сигнала.

Входное напряжение смещения (Input Offset Voltage). Является наиболее важным параметром для прецизионных ОУ. Как правило, прецизионные схемы используются для измерения очень малых величин. Например, для мостовых датчиков давления величина выходного напряжения составляет — десятки мВ. Очевидно, что напряжение смещения на уровне

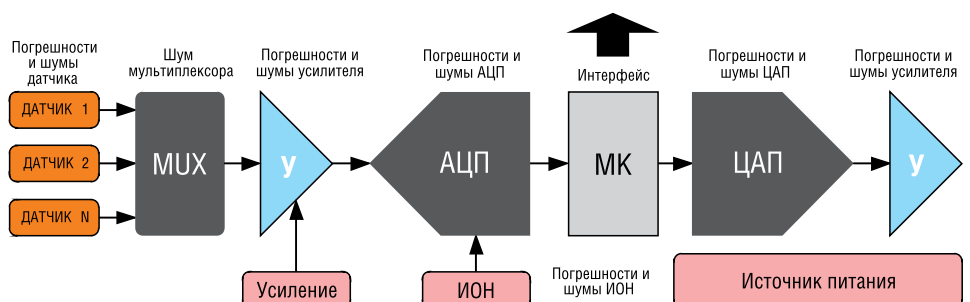


Рис. 1. Погрешности схемы измерительного тракта

десятков мкВ даст очень большую погрешность измерения.

Рассмотрим пример. Система измеряет показания мостового датчика давления с выходным напряжением 20 мВ. Сигнал датчика усиливает ОУ с входным напряжением смещения $U_{см} = 50$ мкВ.

Коэффициент усиления при нормировании для АЦП с опорным напряжением 3 В: $3 \text{ В} / 0,02 \text{ В} = 150$.

Ошибка от напряжения смещения на выходе усилителя: $50 \text{ мкВ} \times 150 = 7,5 \text{ мВ}$. Что соответствует точности всего лишь 8-бит АЦП ($1\text{LSB} = 3\text{В} / 2^8 = 11 \text{ мВ}$).

Очевидно, что такая погрешность недопустима. Поэтому уменьшение влияния напряжения смещения является одной из главных задач.

Стоит отметить, что величина напряжения смещения имеет температурную и временную стабильность.

Температурный дрейф напряжения смещения – ТКС (TC Vos). Измеряется, как правило, в $\text{нВ}/^\circ\text{C}$. При компенсации напряжения смещения в одной температурной точке, например подстроечным резистором, мы не получим точного результата при другой температуре. Кроме того, данная зависимость имеет нелинейный характер, что вносит дополнительную сложность. Стоит особое внимание уделить данному параметру в случае, если диапазон рабочих температур достаточно широкий (например, промышленная или военная электроника).

Не сложно посчитать, что для температурного диапазона $0 \dots 25^\circ\text{C}$ наличие

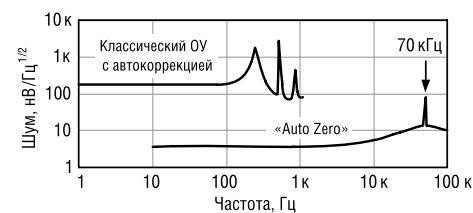


Рис. 2. Типовая зависимость «шум/частота» ОУ с «AutoZero»

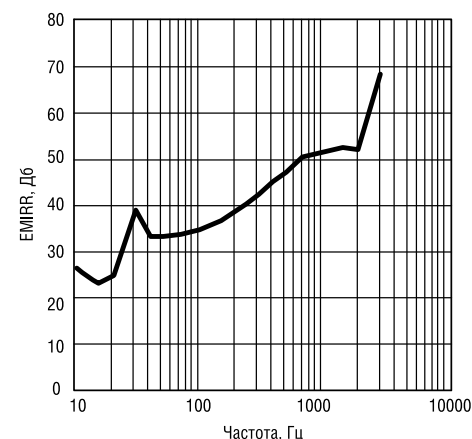


Рис. 3. График подавления электромагнитных помех

дрейфа в $1 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$ может привести к погрешности в 25 мкВ, что для предыдущего примера сравнимо с величиной начального напряжения смещения ($U_{см} = 50$ мкВ).

В дополнение к температурному дрейфу напряжения смещения имеет место его изменение в течение времени. Это явление называется **долговременная стабильность** и измеряется в $\text{мкВ}/1000$ часов.

Входной шум ОУ (Input Voltage Noise) определяется для двух частотных диапазонов. Низкочастотный шум ($1/f$ фликкер-шум) ($0,1 \dots 10$ Гц) измеряется в $\text{нВ}_{\text{п-п}}$. Широкополосный шум (нормируется, как правило, для 1 кГц), измеряется в $\text{нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$. Разделение на частотные диапазоны позволяет разработчику различать широкополосный шум, который может быть отфильтрован при помощи фильтров, и низкочастотный, который отфильтровать практически невозможно.

Коэффициент усиления при разомкнутой обратной связи (Open-Loop Gain) имеет конечное значение, что приводит к возникновению ошибки усиления в схемах с обратной связью. Коэффициент усиления должен иметь как можно большее значение, в этом случае ошибка усиления будет минимальной.

Входной ток ОУ (Input Bias Current). Данный параметр имеет важное значение для схем измерения сигналов высокоимпедансных датчиков. Например, сверхчувствительные фотодиоды при сумеречном освещении могут генерировать токи всего лишь в несколько нА, очевидно, что входной ток ОУ не может превышать данной величины. Величина входного тока сильно зависит от технологии реализации входного каскада ОУ. Для ОУ со входным каскадом на полевых транзисторах величины входных токов могут быть порядка нескольких фА, при этом, однако, имеется сильнейшая температурная зависимость.

Температурный дрейф входного тока. Тип зависимости определяется структурой входного каскада. Каскад, выполненный по биполярной технологии, менее подвержен влиянию температуры. Каскад, выполненный по КМОП технологии, имеет малое значение входного тока, но может удваиваться каждые 10°C .

Ток смещения ОУ (Input Offset Current). Величины входных токов инвертирующего и неинвертирующего входов не равны. По большому счету, именно это отличие в величине втекающих токов и создает погрешность, а не непосредственно втекающий ток. Равенство входного импеданса на входах ОУ приводит к уменьшению влияния входного тока ОУ. Это происходит вслед-

ствие того, что выходное напряжение, формируемое током, втекающим в неинвертирующий вход ОУ, компенсируется выходным напряжением, формируемым током инвертирующего входа.

При реализации конкретного устройства помимо критерия точности к ОУ могут применяться и другие требования. Широкое распространение портативных измерительных приборов выдвигает требования компактности, пониженного напряжения питания и низкой потребляемой мощности. Для промышленных и военных приложений критичным может оказаться фактор защищенности ОУ от электромагнитных и статических помех и возможность работы при повышенных питающих напряжениях.

Как было указано выше, наиболее сильное влияние на точность измерений оказывает напряжение смещения. Элементарные схемы компенсации (такие, как подстроечные резисторы) дают компенсацию только в одной температурной точке из-за температурного дрейфа. Температурный дрейф, к тому же, имеет нелинейный характер, что затрудняет его учет при измерениях. Кроме того, имеет место влияние низкочастотного $1/f$ шума, от которого практически невозможно избавиться.

Одной из прорывных технологий, позволивших значительно увеличить точность ОУ, стала технология автокоррекции нуля (периодической компенсации дрейфа нуля). ОУ с такой технологией называются ОУ, стабилизированными прерыванием.

Однако данная технология обладает рядом недостатков. Во-первых, переключения сопровождалось значительными выбросами напряжений высоким уровнем собственных шумов в области частоты коммутации, что значительно ухудшало шумовые характеристики. Это приводило к необходимости использования внешних фильтров. Кроме того, диапазон рабочих частот оказывался ограниченным величиной собственных коммутаций. Диапазон питающих напряжений также был достаточно мал.

Новое семейство прецизионных ОУ, стабилизированных прерыванием по технологии «AutoZero»

По сравнению с классической схемой ОУ, стабилизированных прерыванием, ОУ с «AutoZero» имеют значительно меньший уровень шумов от переключений. На зависимость «шум/частота» на частоте переключения схемы (около 70 кГц) имеется всего один пик (рисунок 2). Однако так как это более высокочастотный шум по сравнению с классической реализацией схемы с автоподстройкой, то избавиться от него значительно проще.

Компания Maxim Integrated выпустила новую линейку ОУ стабили-

Таблица 1. Прецизионные ОУ с автокоррекцией нуля

Наименование	Число ОУ в корпусе	Питание, В	Ток потребления (типовой), мкА	Напряжение смещения (макс), мкВ	CMRR, дБ	PSRR, дБ	Входной ток (макс), нА	Плотность шума входного напряжения, нВ/√Гц	Плотность шума входного тока, нВ/√Гц
MAX44250	1	2,7...20	1220	9	140	145	1,4	5,9	0,6
MAX44251	2		1150	6			1,3		
MAX44252	4		1150	6			1,3		
MAX44244	1	2,7...36	90	7,5	130	148	0,3	50	0,1
MAX44245	4			7,5					
MAX44248	2			7,5					
MAX44246	2			420					

Таблица 2. Новые прецизионные ОУ от Maxim Integrated

Наименование	Число ОУ в корпусе	Питание, В	Ток потребления (типовой), мкА	Напряжение смещения (макс), мкВ	CMRR, дБ	PSRR, дБ	Входной ток (макс), нА	Плотность шума входного напряжения, нВ/√Гц	Плотность шума входного тока, нВ/√Гц
MAX44260	1	1,7...5,5	750	50	90	95	0,0005	12,7	0,0012
MAX44261	1		750						
MAX44263	2		650						

рованных прерыванием с технологией «AutoZero» (таблица 1).

Новые семейства ОУ, стабилизированных прерыванием с технологией «AutoZero», сочетают превосходные метрологические характеристики и широкий диапазон рабочих частот. Стоит отметить, что кроме этого, в них реализованы дополнительные уникальные технологии Maxim Integrated.

Maxim Integrated уделили особое внимание дополнительной защите от помех. Структура усилителей содержит интегрированный фильтр электромагнитных помех (EMI-фильтр). В итоге помимо того, что благодаря «AutoZero» устранен низкочастотный шум, значительно уменьшается и высокочастотный шум (рисунк 3).

Уделено особое внимание питанию микросхем. Все ОУ имеют расширенный диапазон питающих напряжений. Минимальное напряжение питания составляет всего 2,7 В (или ±1,35 В), что важно для устройств с батарейным питанием. В то же время верхняя граница напряжения питания составляет 36 В (или ±18 В), что может быть удобным при реализации промышленной автоматики.

Широкий выбор корпусных исполнений позволяет выбрать подходящий по габаритам ОУ, в том числе для портативных приложений.

Семейство **MAX44250/51/52** — новые прецизионные ОУ, обладающие всеми отличительными чертами усилителей с технологией «AutoZero»: сверхнизкое

значение напряжения смещения (не более 6 мкВ при 23°C), температурный дрейф ограничивается практически не измеряемой величиной 19 нВ/°С. Шумовые характеристики также на высоте. Величина шума — 123 нВ_{п-п} (0,1 Гц < f < 10 Гц), а плотность шума составляет 5,9 нВ/√Гц.

Еще одной особенностью MAX44250/51/52 является расширенный диапазон питающих напряжений: однополярное от 2,7 до 20 В и биполярное от ±1,35 до ±10 В.

Данное семейство отлично подходит для нормирования и усиления сигналов тензометрических датчиков, датчиков давления в различной медицинской и измерительной аппаратуре.

Микросхемы имеют различное корпусное исполнение, в том числе миниатюрное SOT23-5.

MAX44246 представляет собой двоярный прецизионный усилитель, выполненный в восьмивыводных корпусах uMax или SOIC. Величина напряжения смещения для данного усилителя не превышает 5 мкВ, а температурный дрейф ограничен 20 нВ/°С. Низкочастотные шумы составляют 117 нВ_{п-п} (0,1 Гц < f < 10 Гц), а плотность шума на частоте 1 кГц — 9 нВ/√Гц.

Имея отличные характеристики, MAX44246 способен работать с напряжениями питания от 2,7 до 36 В. (в том числе при биполярном питании от ±1,35 до ±18 В).

Особенностью MAX44246 является малое потребление. Ток потребления со-

ставляет всего 0,55 мА на канал, что позволяет применять его не только в стационарных измерительных приборах, но и в портативных с батарейным питанием.

MAX44244/5/8 — семейство малопотребляющих прецизионных ОУ. Главной его особенностью является низкий ток потребления — всего 90 мкА.

Низкое потребление и миниатюрность корпусов (MAX44244 доступен в корпусе SOT23-5) делают данное семейство подходящим для портативной измерительной техники, прецизионного измерения веса, интерфейсов с токовой петлей.

Прецизионные ОУ от Maxim Integrated

Помимо ОУ с технологией «AutoZero» Maxim Integrated предлагает семейство усилителей **MAX44260/1/3**, главной особенностью которого является автоматическая калибровка при включении питания (таблица 2). При подаче питающего напряжения интегрированная в ОУ схема сброса по питанию (POR) удерживает входы и выходы в высокоимпедансном состоянии в течение 10 мс. За это время внутренняя схема коррекции калибрует ОУ. Такая техника позволяет получить напряжение смещения нуля около 50 мкВ.

MAX44260 имеет дополнительный вход SHDN, позволяющий перевести ОУ в режим пониженного потребления (менее 1 мкА). Выходы и входы

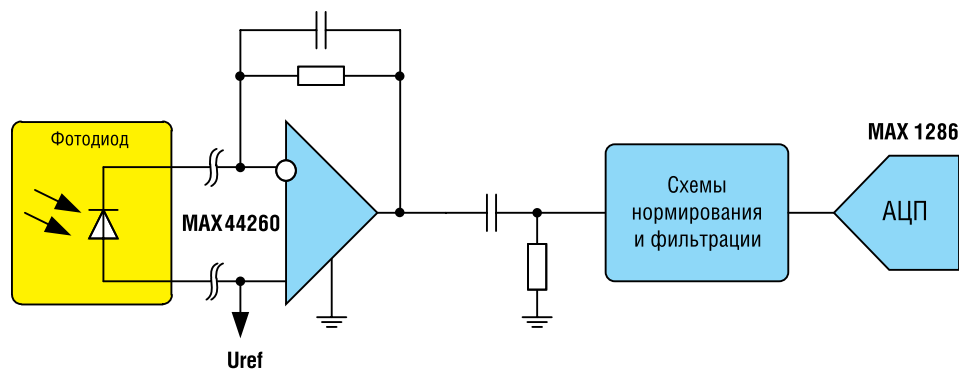


Рис. 4. Трансимпедансный усилитель на основе MAX44260

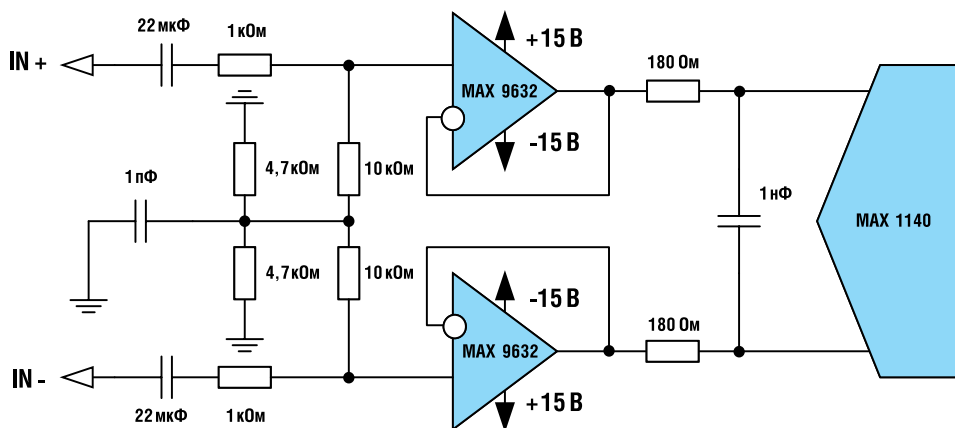


Рис. 5. Типовая схема включения MAX9632

ОУ при этом находятся в высокоимпедансном состоянии, благодаря этому возможно каскадирование ОУ, что избавляет от необходимости использовать мультиплексоры. При выходе из данного режима калибровка не производится, что позволяет достичь времени пробуждения не более 30 мкс.

В отличие от MAX44260 в ОУ MAX44261 возможно проведение калибровки без выключения питания. Для этого предназначен дополнительный управляющий вход CAL.

Микросхема MAX44263 имеет два ОУ в одном корпусе.

Общей особенностью всех трех микросхем является отсутствие переходных искажений при переходе через 0 (при переключении входных транзисторов). Это достигается наличием внутреннего преобразователя (*charge pump*). Выходное напряжение этого преобразователя превышает напряжение питания на 1 В и используется для питания входного каскада.

Помимо малого напряжения смещения, MAX44260/1/3 отличаются низким уровнем собственных шумов. Шум входного напряжения составляет 12,7 нВ/√Гц, шум входного тока 1,2 фА/√Гц. При этом частота единичного усиления составляет 15 МГц. Низкие шумы и большая частота единичного усиления позволяют применять данное

семейство в составе трансимпедансных усилителей (рисунок 4).

Стоит отметить, что семейство MAX44260/1/3 идеально подходит для портативных устройств с батарейным питанием (ноутбуки, плееры), так как имеет низкое потребление и малое напряжение питания. Типовой питающий ток каждого усилителя составляет 700 мкА. При этом MAX44260 в спящем режиме потребляет всего 1 мкА. Уровень напряжения питания составляет 1,8 В (при температуре от -40 до 125°C), а при температуре от 0 до 70°C всего 1,7 В.

Прецизионный, высокоскоростной, малозумящий ОУ для широкого круга задач

Кроме ОУ, стабилизированных прерыванием, и ОУ с возможностью калибровки Maxim Integrated выпускает MAX9632 – прецизионный малозумящий ОУ с широким диапазоном питающих напряжений, сочетающий в себе уникальные метрологические характеристики, отличное быстродействие, защиту от электростатики и лучшие в своем классе значения CMRR, THD, PSSR.

MAX9632 имеет напряжение смещения нуля не более 125 мкВ (при 25°C) и температурный дрейф не более 0,5 мкВ/°C. Шум входного напря-

жения составляет всего 0,94 нВ/√Гц. При этом ширина пропускания составляет 55 МГц.

Второй особенностью усилителя является улучшенная защита от электростатических разрядов. Микросхема выдерживает 8 кВ (Human Body Model – HBM) и 1 кВ (Charge Device Model – CDM).

Данный ОУ обладает широким диапазоном питающих напряжений 4,5...36 В (в том числе ±18 В).

MAX9632, обладая уникальными метрологическими характеристиками и высоким быстродействием, идеально подходит для совместной работы с высокоскоростными дельта-сигма АЦП. Такие АЦП требуют ОУ с низким значением собственных шумов для достижения соотношения сигнал-шум (SNR) большего, чем 100 дБ. В приведенной схеме (рисунок 5) АЦП MAX1140 достигает соотношения SNR 117 дБ при частоте 1000 измерений в секунду.

Основными областями применения данного ОУ являются прецизионная измерительная техника, высокоскоростные системы управления и контроля, системы релейной защиты, медицинская техника и т.д.

Заключение

Компания Maxim Integrated предлагает свои решения для построения прецизионных измерительных схем. Семейства прецизионных ОУ с «Auto Zero» обладают напряжением смещения, не превышающим 10 мкВ. Кроме того, они имеют интегрированный ЕМI-фильтр и отличаются расширенным диапазоном питающих напряжений. Помимо семейств с автокоррекцией, представлено семейство MAX44260/1/3 с калибровкой при включении. После калибровки напряжение смещения не превышает 50 мкВ. Прецизионный ОУ MAX9632 сочетает в себе быстродействие, защиту от статики и широкий диапазон питающих напряжений.

Литература

1. Maurizio Gavardoni, Application Note 4179 Autozero Noise Filtering Improves Instrumentation Amplifier Output. Maxim Integrated, 2009.
2. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. — М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2005.
3. Документация на представленные ОУ. Официальный сайт www.maximintegrated.com.

Получение технической информации, заказ образцов, поставка – e-mail: analog.vesti@compel.ru

Билл Лаумайстер, Дэвид Фрай (Maxim Integrated)

ОСОБЕННОСТИ ТОПОЛОГИИ И ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКОВ ОПОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В статье рассматриваются наиболее распространенные топологии источников опорного напряжения (ИОН): трехвыводные ИОН типа «Bandgar» и ИОН на стабилитронах со скрытой структурой, а так же двухвыводные параллельные ИОН на стабилитронах. Кроме того, в статье раскрывается суть основных параметров источников опорного напряжения.

При выборе ИОН, в первую очередь, рассматривают такие характеристики, как номинальное выходное напряжение и его начальная точность установки, при этом забывая о множестве других параметров, которые могут иметь большую важность в определенных приложениях. Кроме того, рассматривая суммарную погрешность при проектировании схем с преобразователями сигналов (ЦАП, АЦП), необходимо учитывать и погрешности ИОН [1].

Дальнейшее рассмотрение базовых основ ИОН поможет лучше понять особенности различных типов ИОН и их основных параметров, соответствующих наиболее распространенным топологиям: двухвыводным параллельным (шунтовым) и трехвыводным последовательным [2,3].

Разновидности ИОН

Существует три широко распространенных технологии реализации ИОН: на транзисторах с плавающими затворами, на стабилитронах, ИОН на напряжении запрещенной зоны (технология «Bandgar»). ИОН на транзисторах с плавающими затворами имеют ограниченное применение (исключительно в защищенных устройствах) из-за своей высокой чувствительности к радиационному излучению. Альфа, бета, гамма, космическое излучение или рентгеновские лучи в аэропортах, больницах, на транспорте разряжают емкости затворов.

Второй тип ИОН основан на использовании стабилитронов. Стабилитроны с лавинным типом пробоя могут стабилизировать напряжение выше 5,5 В (крутой участок ВАХ), величина стабилизируемого напряжения зависит от технологического процесса производства полупроводника. Стабилитроны с туннельным пробоем позволяют по-

лучать меньшие напряжения стабилизации. Основным источником шумов в стабилитронах являются неоднородности и дефекты у поверхности кристалла, в ИОН на основе стабилитронов со скрытой структурой эта проблема решается помещением стабилитрона вглубь кристалла или под его поверхность.

Наиболее распространенным типом ИОН является «Bandgar». В них используется пара транзисторов с различными плотностями токов и, соответственно, различными температурными коэффициентами. Напряжения с противоположными по знаку температурными коэффициентами, вычитаясь друг из друга, дают практически плоскую температурную зависимость [4].

Последовательные и параллельные ИОН могут использовать любую из описанных технологий. В приложении приводится сравнение последовательных и параллельных ИОН с различными технологиями.

Двухвыводные параллельные ИОН

Как следует из названия, параллельный ИОН включается параллельно нагрузке (рисунок 1). Он может рассматриваться как источник тока, контролируемый выходным напряжением. На холостом ходу вытекающий ток создает на резисторе R1 желаемое напряжение ($V_{IN} - I_{REF} * R1 = V_{REF}$). Если, к примеру, $V_{IN} = 6,0$ В, а желаемое напряжение V_{REF} равно 5,0 В, то ток I_{REF} создает на R1 падение 1 В. ИОН подстраивает I_{REF} таким образом, чтобы на выходе оставалось 5,0 В.

Подключим нагрузку к выходу ИОН. Теперь I_{REF} больше не равен I_{R1} , потому что ток нагрузки (I_L) создает дополнительное падение напряжения на R1. ИОН автоматически уменьшает I_{REF} на величину I_L . В итоге суммарный ток, протекающий через R1, не меняется (то

есть сумма $I_{REF} + I_L$ равна исходной величине I_{R1}). Ток I_{R1} разделяется и течет параллельно как в нагрузке, так и в ИОН, отсюда и название «параллельный ИОН». Такой ИОН стабилизирует выходное напряжение, подстраивая ток I_{REF} противоположно изменению тока нагрузки I_L .

Трехвыводные последовательные ИОН

Последовательный ИОН (рисунок 2), может рассматриваться как переменный резистор, управляемый напряжением. Выходное напряжение V_{OUT} контролирует внутреннее сопротивление между входом и выходом ИОН. Ток, протекающий через внутреннее контролируемое сопротивление, создает падение напряжения между входом и выходом ИОН. Без нагрузки через внутреннее сопротивление (R), протекает малый ток (I_Q), обеспечивая падение напряжения между входом и выходом, необходимое для обеспечения требуемого V_{OUT} .

При увеличении тока нагрузки ИОН поддерживает требуемое выходное напряжение, изменяя R для обеспечения корректного падения напряжения между входом и выходом. В соответствии с законом Ома, для поддержания постоянного напряжения между входом и вы-

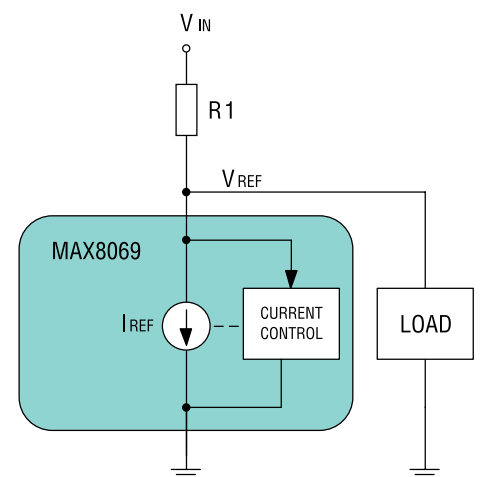


Рис. 1. Параллельный ИОН подключается параллельно нагрузке

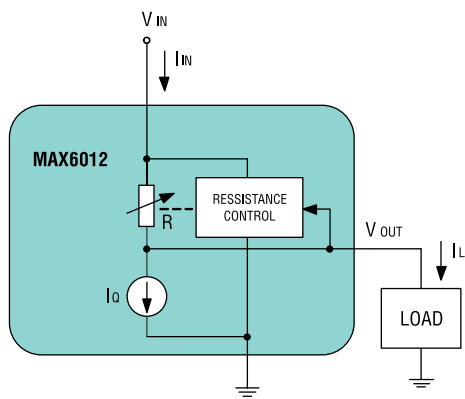


Рис. 2. Регулирующая часть последовательного ИОН подключена последовательно с нагрузкой

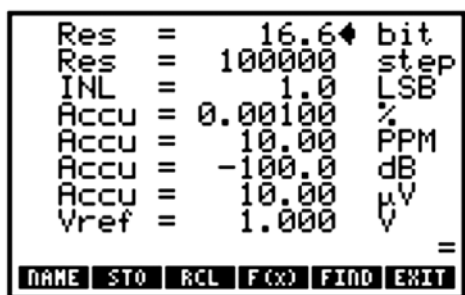


Рис. 3. Точность в процентах полной шкалы (%), ppm, дБ, В и мкВ

ходом R должно уменьшаться при увеличении I_{OUT} .

Единицы измерения для параметров ИОН

Единицы измерения таких параметров, как, например, точность, могут отличаться у разных производителей. Наиболее часто для определения точности используются: проценты от полной шкалы (%), миллионная доля (ppm), децибелы (дБ), напряжение (В или мкВ). Каждая из этих единиц допустима, но для корректного сравнения параметров необходимо уметь переводить одни единицы в другие [5].

Калькулятор погрешностей (рисунок 3) может помочь в разработке и анализе цепей с ИОН и преобразователями сигналов. Он вычисляет постоянную составляющую погрешности идеального преобразователя, использующего как ЦАП, так и АЦП. Постоянная составляющая погрешности преобразователя определяется как максимальное отклонение от идеальной передаточной функции. Хотя HP® 50g и удобный инструмент, существует еще и бесплатный эмулятор, который может использоваться на компьютерах с ОС Windows®. Для дополнительной информации о калькуляторе погрешностей, в

том числе — о бесплатном эмуляторе, см. Steve's Analog Design Calculators.

Точность в процентах от полной шкалы

Наиболее часто точность определяется в процентах от номинального значения. По сути, проценты не являются единицей измерения. Это условная величина для определения точности, например, резисторов, конденсаторов и индуктивностей. Типовые значения погрешностей ИОН 1%, 1,5%, 2%, 5%, и т.д. Хотя измерение погрешностей в процентах удобно для сравнения ИОН, это не дает необходимой информации о колебаниях напряжений, и наибольшее значение имеет знание величины колебаний, выраженное в вольтах.

Если известна погрешность в процентах, то для определения отклонения напряжения, выраженного в вольтах, необходимо умножить номинальное выходное напряжение на погрешность в процентах и разделить на 100. К примеру, при номинальном напряжении 2,5 В и погрешности 1,5% имеем отклонение: $\pm(2,5 \text{ В} \times 1,5)/100 = \pm 0,0375 \text{ В}$, или $\pm 37,5 \text{ мВ}$.

Так как ошибка может быть как положительной, так и отрицательной, то суммарное отклонение будет в два раза

Таблица 1. Преимущества и недостатки ИОН на стабилизаторах

Преимущества	Недостатки
Внешний резистор и выходной конденсатор фильтруют помехи по питанию	Рабочий ток изменяется при изменении напряжения питания
Низкое напряжение питания	Большая рассеиваемая мощность
Миниатюрный корпус	Требует осторожного выбора ограничительного резистора основанного на требованиях питания и величины нагрузки
Стабилен в широком диапазоне емкостной нагрузки	Внешний резистор требует дополнительного пространства на плате
Может быть использован как ограничитель напряжения	Требует точного и стабильного питающего напряжения для поддержания выходной точности
Может использоваться при любом питающем напряжении	Низкая эффективность
Низкая стоимость	Низкая начальная точность (зависит от конкретного типа)
	Низкая температурная стабильность

Таблица 2. Преимущества и недостатки ИОН на стабилизаторах со скрытой структурой

Преимущества	Недостатки
Уменьшает шум (исключено влияние поверхности кристалла)	Требует питающего напряжения свыше 5 В
Низкая температурная нестабильность в сравнении с «Bandgap» и ИОН на стабилизаторах	Большая потребляемая мощность
Низкий временной дрейф	Дороговизна
Высокая точность	

Таблица 3. Преимущества и недостатки «Bandgap»-ИОН

Преимущества	Недостатки
Низкая потребляемая мощность	Средние шумовые характеристики
Достаточная начальная точность, которая может быть улучшена подстройкой	Средняя температурная нестабильность
Обеспечение стабильного напряжения вплоть до 1 В (идеально для портативных приборов)	Большой корпус

больше — 75 мВ. $2,5 \text{ В} \pm 0,0375 \text{ В} = 2,4625...2,5375 \text{ В}$

Зная допустимые пределы отклонения напряжения, можно выбрать соответствующий ИОН.

Точность, измеряемая в ppm

Другая единица измерения точности — миллионная доля (parts per million, ppm). Она, как правило, используется для характеристики температурных коэффициентов и других параметров, изменение которых под действием различных факторов невелико. Для 2,5 В, 1 ppm — это одна миллионная от 2,5 В, то есть 2,5 мкВ. Если ИОН имеет точность 10 ppm (что весьма неплохо для любого ИОН), его выходная точность составит: $2,55 \text{ В} \times 10/10^6 = 25 \text{ мкВ}$.

Отклонение напряжения при этом $2,5 \text{ В} \pm 25 \text{ мкВ} = 2,499975...2,500025 \text{ В}$.

Преобразуя в проценты, получаем: $\pm(25 \times 10^{-6} \text{ В}) \times 100/2,5 \text{ В} = \pm 0,001\%$.

Точность в битах

Использование термина «бит» в качестве единицы измерения точности, например, «16-битный ИОН», неоднозначно. Выражает ли это измеряемую точность, или значит, что этот ИОН достаточно точен для использования совместно с 16-битным АЦП? 16-битный ИОН должен быть точен с погрешностью 1 LSB или 2 LSB соответственно, он не обязательно подходит для 16-битной системы.

Если единица измерения характеризует непосредственные измерения, то «16-битная точность» это всего лишь значение параметра, деленное на заявленное разрешение в битах, выраженное в десятичном виде. Например, номинальное напряжение 2,5 В для ИОН с заявленной 16-битной точностью (еще один пример отличной точности для любого ИОН), должно быть разделено на десятичное значение 16 бит: $2^{16} = 65536$. Поэтому 1 бит — это $1/65536$ часть от номинального значения. Тогда $2,5/65536 \approx 38 \text{ мкВ}$. Если мы примем точность в 1 бит ($\pm 1 \text{ LSB}$), выходное отклонение может быть на 1 бит больше или меньше номинального значения, то есть $\pm 38 \text{ мкВ}$.

Отклонение напряжения при этом $2,5 \text{ В} \pm 38 \text{ мкВ} = 2,499962...2,500038 \text{ В}$.

Преобразуя в проценты, получаем: $(\pm 38 \times 10^{-6} \text{ В}/2,5 \text{ В}) \times 100 = \pm 0,0015\%$.

Основные типовые параметры ИОН

Параметр «начальная точность» говорит сам за себя. Можно взять произвольно выбранный компонент из партии, установить в тестовую схему контрольно-проверочной аппаратуры и измерить выходное напряжение. Измеренное значение должно находиться в диапазоне заданной начальной точности, определенной в документации.

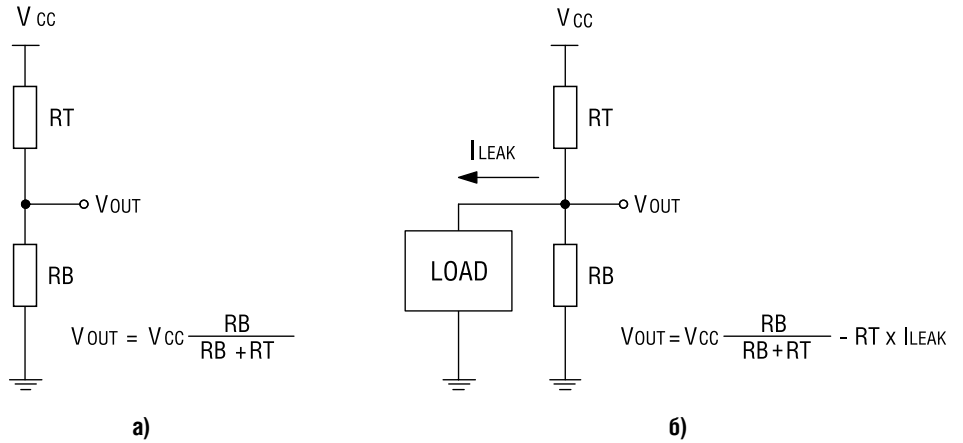


Рис. 4. Аналогия ИОН и резистивного делителя без нагрузки (а) и с нагрузкой (б)

Данная характеристика, как правило, приводится для комнатной температуры, для конкретного значения входного напряжения и выходного тока. Этот параметр является отправной точкой для большинства других параметров. Начальная точность зависит от температурных перегрузок корпуса, поэтому необходимо следовать правильному температурному режиму при пайке, а деформация печатной платы должна быть сведена к минимуму. Температурные перегрузки способны вызывать изменения начальной точности, эти изменения характеризуются температурным гистерезисом и долговременной нестабильностью (временной дрейф). По этой причине в промышленности и, особенно, в военной отрасли требуются новые компоненты с кодом даты, не превышающим несколько лет.

Температурный коэффициент напряжения (ТКН) характеризует изменение выходного напряжения при изменении температуры окружающей среды или температуры корпуса. В зависимости от структуры ИОН и способа подстройки выходного напряжения в процессе начальной калибровки, изменение напряжения от температуры может иметь как положительный знак (напряжение увеличивается при увеличении температуры), так и отрицательный (напряжение уменьшается с ростом температуры). Зависимость от температуры практически никогда не линейна. Например, увеличение температуры от 25 до 30°C не приведет к тому же изменению выходного напряжения, как при изменении температуры от 65 до 70°C, хотя рост температуры такой же [6].

Для аналогии рассмотрим простейший резистивный делитель без нагрузки (рисунок 4а). Напряжение в общей точке (V_{OUT}) является частью приложенного напряжения (V_{IN}), пропорциональному отношению номиналов резисторов. Оба резистора меняются с изменением температуры одинаково, поддерживая отношение номиналов постоянным, а значит, V_{OUT} также не меняется.

Легко заметить, что ток, протекающий через резисторы, меняется с изменением температуры, и ток нагрузки (вытекающий или втекающий) меняет V_{OUT} (рисунок 4б). При комнатной температуре это изменение может быть скомпенсировано подстройкой одного из резисторов (изменением значения его сопротивления). Однако, если ток нагрузки зависит от температуры не так, как ток, протекающий в делителе, то значение V_{OUT} будет зависеть от температуры. Это изменение V_{OUT} от температуры называется температурным коэффициентом (ТКН). Хотя эта аналогия весьма упрощенно показывает сложные процессы, происходящие в ИОН, тем не менее, она передает идею температурного коэффициента.

Температурный гистерезис — это изменение выходного напряжения при циклических изменениях температуры. Для измерения этого параметра необходимо взять типовую схему с ИОН, предназначенную для работы, например, в расширенном температурном диапазоне -40...85°C. Далее измерить выходное напряжение при комнатной температуре (25°C). Понизить температуру до -40°C, затем поднять ее до 85°C, после чего опять установить температуру 25°C. Вновь измерить выходное напряжение. Разность в полученных измерениях, если она присутствует, и есть температурный гистерезис. Стоит отметить, что также допустимо сначала разогреть систему до 85°C, потом охладить до -40°C и вновь поднять температуру до 25°C. Изменение выходного напряжения при этом сменит знак. Можно заметить, что после ряда последовательных температурных циклов величина выходного напряжения становится другой. Это является следствием того факта, что температурный гистерезис при разогреве и охлаждении имеет разные знаки, и результирующие изменения выходного напряжения при последовательных температурных циклах компенсируют друг друга, в итоге среднее выходное напряжение стремится к номинальному зна-

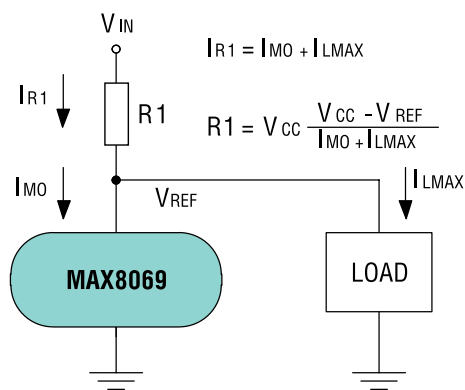


Рис. 5. Протекающий ток необходим для анализа рабочего режима параллельного ИОН

чению. Данный параметр связан с напряжением кристалла. Температурные циклы сглаживают эти напряжения. Обычно после пяти циклов напряжение кристалла уменьшается до минимума. Однако, напряжения в кристалле могут возникнуть вновь, например, в процессе пайки или при деформации корпуса.

Коэффициент стабилизации по входному напряжению характеризует изменение выходного напряжения при изменении входного. Этот параметр

особенно важен при изменениях входного напряжения во время использования ИОН, например в приложениях с батарейным питанием. Измеряется он в ppm/V или в %/V. Коэффициент стабилизации по входному напряжению — это статический параметр, который определяется для режима постоянных токов. Он измеряется по разности значений выходных напряжений для двух (или более) различных значений постоянного входного напряжения, при этом не имеет значения, как быстро менялось входное напряжение. В общем случае, коэффициент стабилизации ухудшается обратно частоте изменения входного напряжения. Для приложений, в которых возможны переходные процессы, на входе ИОН рекомендуют помещать конденсатор для уменьшения скачков напряжения.

Коэффициент стабилизации по току нагрузки характеризует изменение выходного напряжения при изменении выходного тока. Этот параметр важен, когда нагрузочный ток меняется в процессе работы, например, когда нагрузкой ИОН является ЦАП R-2R типа. Значение входного сопротивле-

ния значительно изменяется с изменением кода ЦАП. Коэффициент стабилизации по току — также статический параметр, определяемый для режима постоянных токов. Он характеризуется изменением выходного напряжения для двух (или более) значений выходного тока и не зависит от скорости его изменения. В общем случае коэффициент стабилизации по току ухудшается обратно пропорционально частоте изменения входного напряжения. Рекомендуется использовать выходной конденсатор для сглаживания выходного напряжения в приложениях с изменяющимся выходным током. Единицами измерения являются ppm/mA, %/mA, возможно использование отношения выходного напряжения при работе на холостом ходу и при максимальной нагрузке, выраженное в процентах.

Долговременная нестабильность (временной дрейф) является важным параметром, если точность ИОН должна сохраняться при длительной работе (дни, недели, месяцы). Этот параметр выражает изменение выходного напряжения с течением времени при определенных условиях для стационарного

Таблица 4. ИОН производства Maxim Integrated

Наименование	Начальная точность макс, ± %	Шум (0,1...10 Гц), мкВП-П	Температурный коэффициент, ppm/°C, макс	Ток потребления макс, мкА	Особенности
<u>DS4303</u>	0,03	200	30	1,6	Подстраиваемый
<u>LM4040</u>	0,1	35	50	60	АЕС-Q100 параллельный
<u>LM4041</u>	0,1	20	100	65	Параллельный
<u>LM4050</u>	0,1	35	50	60	АЕС-Q100 параллельный
<u>MAX6006</u>	0,2	60	30	1	Параллельный
<u>MAX6012</u>	0,3	12	20	35	—
<u>MAX6018</u>	0,2	36	60	5	—
<u>MAX6023</u>	0,2	25	30	35	—
<u>MAX6029</u>	0,15	80	30	5	—
<u>MAX6033</u>	0,04	16	7	75	—
<u>MAX6034</u>	0,2	45	30	115	—
<u>MAX6035</u>	0,2	21	25	95	—
<u>MAX6037</u>	0,2	6	25	275	Регулируемый
<u>MAX6043</u>	0,05	4	15	490	—
<u>MAX6061</u>	0,4	13	20	125	—
<u>MAX6070</u>	0,04	6	7	150	Вход разрешения
<u>MAX6100</u>	0,4	18	75	150	—
<u>MAX6101</u>	0,4	13	75	150	—
<u>MAX6125</u>	1	15	50	100	Регулируемый
<u>MAX6126</u>	0,02	1,45	3	550	Подстраиваемый
<u>MAX6129</u>	0,4	30	40	5	—
<u>MAX6133</u>	0,04	16	3	80	—
<u>MAX6138</u>	0,1	35	25	65	Параллельный
<u>MAX6143</u>	0,1	4	3	490	Подстраиваемый, датчик температуры
<u>MAX6160</u>	1	15	100	100	Регулируемый
<u>MAX6173</u>	0,06	3,8	3	450	Подстраиваемый, датчик температуры
<u>MAX6190</u>	0,1	40	5	35	—
<u>MAX6220</u>	0,1	1,5	20	3,3	Подстраиваемый
<u>MAX6225</u>	0,04	1,5	2	2,7	Подстраиваемый
<u>MAX6325</u>	0,02	2,5	1	2,9	Подстраиваемый

режима работы. Долговременная нестабильность определяет минимальное и максимальное изменение напряжения в течение длительного периода времени, а не изменение показаний между временными точками «А» и «Б». Остальные факторы (например, температура, входное напряжение, выходной ток) должны сохранять свои значения для того, чтобы напряжение попадало в заявленный диапазон. Обычно единицы измерения этого параметра — ppm на 1000 часов работы.

Ток потребления является очевидным параметром, но рассмотрим различные варианты.

Для последовательных ИОН термин «ток холостого хода» определяется в документации и часто взаимозаменяем с термином «ток потребления» (I_Q). Это связано с тем, что фактический потребляемый ток ИОН и есть ток холостого хода, при наличии нагрузки через ИОН течет еще и нагрузочный ток.

Для обычных параллельных ИОН в документации не определен ток холостого хода. Вместо этого используется термин «минимальный рабочий ток» (I_{MO}). Этот параметр характеризует минимальный ток, необходимый ИОН для обеспечения постоянства выходного напряжения. Стоит помнить, что параллельный ИОН при максимально допустимом токе нагрузки должен потреблять ток, как минимум, равный минимальному рабочему току. В этом случае ток, протекающий через последовательный резистор ($R1$), равен сумме максимального тока нагрузки и минимального рабочего тока (рисунок 5). Для ряда приложений минимальный рабочий ток (который может называться «ток регулирования») считают несущественным относительно тока нагрузки, и не учитывают в расчетах.

Ток через вывод земли характеризует последовательные ИОН. Он определяет рабочий ток при заданной нагрузке. Ток, втекающий через вход последовательного ИОН, является суммой тока нагрузки и рабочего тока. Ток через вывод земли характеризует значения тока потребления при наличии нагрузки.

Собственное падение напряжения (V_{DO}) является очень важным параметром для низковольтных приложений и приложений с батарейным питанием. Параметр применим только к последовательным ИОН (он так же важен, как и I_{MO}). Минимальное падение напряжения между входом и выходом позволяет ИОН поддерживать заявленную точность ($V_{OUT} + V_{DO}$ = минимальное входное напряжение). Так как напряжение батареи падает при разряде, то для увеличения времени ее использования ИОН должен поддерживать величину выходного напряжения при как можно более низком напряжении батареи.

Поэтому меньшее значение собственно падения напряжения позволяет работать даже при пониженных уровнях заряда. Пристальное внимание следует уделять току, для которого указано значение V_{DO} : при малых токах величина V_{DO} имеет малое значение. Это аналогично протеканию малых токов через «rail-to-rail»-выход.

Допустимая емкость нагрузки является очень важным параметром и характеризует способность ИОН к перезаряду емкости нагрузки. Это связано с тем, что обычный ИОН включает в себя цепи обратной связи, их устойчивость может быть нарушена емкостной нагрузкой, которая, вызывая большой фазовый сдвиг в контролирующей цепи, приводит к возникновению положительной обратной связи на конкретной частоте. Следует внимательно ознакомиться с документацией, описывающей диапазон разрешенной емкостной нагрузки. Некоторые производители указывают этот параметр только в тексте документации, не вынося его в таблицу с основными параметрами.

Шум всегда присутствует на выходе ИОН, однако зачастую им пренебрегают. Он представляет собой производный сигнал, который генерируется внутренними пассивными и активными элементами интегральной схемы и значительно влияет на точность. Например, при шуме в 1 мВ р-р точность выходного напряжения ограничена 1 мВ на постоянном токе. Для 1,2 В ИОН такой шум добавит к начальной погрешности 0,1%.

В документации, как правило, указывают величину шумов для двух частотных диапазонов: низкочастотный шум, 0,1...10 Гц, измеряемый в мкВП-П, и широкополосный шум, 10 Гц...1 кГц, измеряемый в мкВ ср.кв. Разделение на частотные диапазоны позволяет разработчику отличать широкополосный шум, который может быть отфильтрован при помощи конденсаторов с адекватными номиналами, от низкочастотного, который отфильтровать нельзя. При этом, даже если величина выходного конденсатора будет достаточна для фильтрации низкочастотного шума, этот конденсатор может привести к самовозбуждению ИОН. Существует программный калькулятор, помогающий рассчитывать величины шумов [7].

Коэффициент передачи по переменному току, как правило, не помещают в табличные данные, но он, тем не менее, влияет на производительность ИОН. В большинстве приложений питающее напряжение ИОН имеет выбросы. Эти выбросы покрывают широкий частотный диапазон. Точность ИОН обратно пропорциональна частоте изменения входного напряжения. В документации эта зависимость от частоты, как

правило, отображается в виде графика. Данный график показывает чувствительность ИОН ко входным шумам и используется для определения требований ко входному фильтру. При увеличении частоты выходного шума фильтр должен уменьшать уровень входных помех, чтобы ИОН достиг необходимой точности.

Коэффициент подавления помех с шины питания (PSRR) иногда указывают в документации. PSRR; как правило, его измеряют в дБ. Он характеризует, насколько сильно подавляется шум выходного сигнала относительно входного ($PSRR = \Delta V_{CC} / \Delta V_{OUT}$).

Полное выходное сопротивление является еще одним параметром, который может отсутствовать в таблице. Этот параметр важен, если ток нагрузки постоянно изменяется. Обычно точность ИОН при этом обратно пропорциональна частоте изменения тока. График зависимости полного выходного сопротивления от частоты, как правило, приводится в документации. Этот график показывает, какой выходной фильтр необходим при заданной величине изменений нагрузки для достижения требуемой точности.

Переходная характеристика обычно представляется в виде снимка осциллограммы, на которой изображены ступенчатое изменение входного напряжения и соответствующая реакция выходного напряжения. Этот снимок показывает время восстановления до требуемой точности после такого воздействия. Стоит помнить, что данная осциллограмма приводится для конкретных значений входных и выходных емкостей. Эти емкости имеют большое влияние на данную характеристику.

Нагрузочная переходная характеристика (время установления выходного напряжения) обычно представляется в виде снимка осциллограммы, на которой изображены ступенчатое изменение выходного тока и соответствующая реакция выходного напряжения. Этот снимок отражает время восстановления заявленной точности выходного напряжения при заданном воздействии. Стоит помнить, что данная осциллограмма приводится для конкретных значений входных и выходных емкостей. Эти емкости оказывают сильное влияние на данную характеристику.

Время установления после включения/выключения характеризует время стабилизации выходного напряжения при подаче напряжения питания. При этом имеется в виду только стабилизация выходного напряжения, которое не обязательно достигает точного номинального значения. Обычно этот параметр устанавливается для большей погрешности выходного напряжения, чем заявленная, что необходимо

учитывать. Значение этого параметра сильно зависит от параметров входных и выходных емкостей. Кроме того, ИОН не должен выходить за рамки допустимых значений токов при заряде выходных емкостей. **Время выключения** характеризуется уменьшением выходного напряжения до значений, близких к нулевым, при выключении питания. Этот параметр также сильно зависит от величины входных и выходных емкостей.

Выходной ток короткого замыкания характеризует функцию защиты от замыкания на землю или вход ИОН. Выражает величину выходного тока при замыкании выхода на GND или IN. Обычно это аварийное состояние, в которое ИОН входит под действием нагревания. В разделе предельно допустимых значений указывают время, в течение которого ИОН может находиться в данном режиме.

Двухвыводной параллельный ИОН (на основе стабилитронов)

ИОН на стабилитронах применим для напряжений более 5 В. В стабилитроне ток при обратном смещении вначале слабо зависит от напряжения, а потом лавинообразно нарастает при росте напряжения. Последовательный резистор ограничивает рост тока, позволяя стабилизировать обратное напряжение.

Стабилитрон ведет себя как обычный шунт или как двухвыводной ИОН. Он также может использоваться как ограничитель напряжения.

Двух и трехвыводные последовательные «Bandgap»-ИОН

Для устройств с напряжениями ниже 5 В необходим компромисс между стоимостью и высоким уровнем разрешения (низкие уровни шумов и высокая точность), поэтому «Bandgap» стали наиболее востребованным типом ИОН. Они компенсируют температурную нестабильность благодаря отрицательному температурному коэффициенту прямо смещенного база-эмиттерного перехода и положительному температурному коэффициенту выходного напряжения, которое пропорционально температуре. Такое напряжение получается усилением напряжения между двумя прямо смещенными p-n переходами.

Заключение

Зачастую выбор ИОН делается в спешке. Перед принятием решения разработчик зачастую обращает внимание только на цену и заявленную начальную точность, выделенную в документации. Сравнение различных источников опорного напряжения должно быть адекватным, а сравниваемые параметры — измеряться в одних единицах. Необходимо

определять, какие из параметров наиболее важны для вашего конкретного случая, нельзя ограничиваться только начальной точностью.

Литература

1. Application note 4300, "Calculating the Error Budget in Precision Digital-to-Analog Converter (DAC) Applications." Maxim Integrated.
2. Application note 4003, "Series or Shunt Voltage Reference?". Maxim Integrated.
3. Application note 2879, "Selecting the Optimum Voltage Reference." Maxim Integrated.
4. Application Note 5062, "«Bandgap» Reference Calculator Tutorial." Maxim Integrated.
5. «Steve's Analog Design Calculators» (<http://www.maximintegrated.com/design/tools/calculators/hp50g/>)
6. Application Note 4419, "Understanding Voltage-Reference Temperature Drift." Maxim Integrated.
7. Application note 5059, "Thermal Noise Calculator Tutorial." Maxim Integrated.

Получение технической информации, заказ образцов, поставка – e-mail: analog.vesti@compel.ru



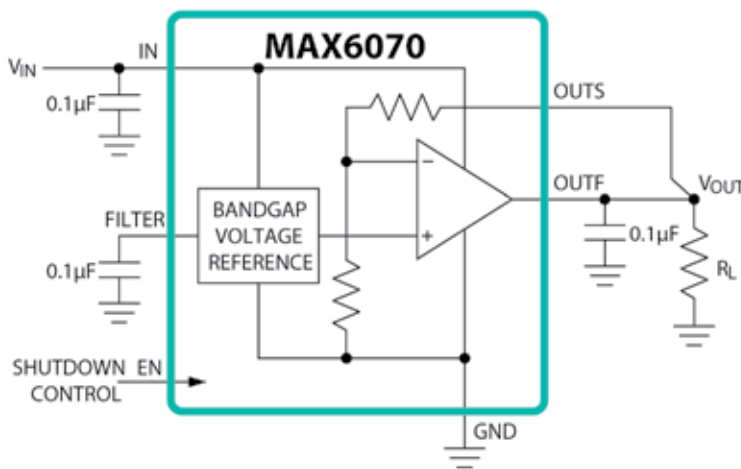
Семейство ИОН MAX6070, MAX6071



Отличная температурная и долговременная стабильность метрологических характеристик в корпусе SOT23

Преимущества

- Низкое значение температурного дрейфа: 6 ppm/°C (max)
- Высокая долговременная стабильность: 35 ppm/1,000 часов
- Высокая начальная точность: 0,04%
- Низкое значение шума: 4,8 мкВРР
- Встроенный фильтр (MAX6070)
- Компактный корпус SOT23



Логотип Maxim Integrated – торговая марка Maxim Integrated Products, Inc.

Москва
Тел.: (495) 234-7764, доб. 2328
Соколов Андрей
E-mail: a.sokolov@compel.ru

Санкт-Петербург
Тел.: (812) 327-9403, доб. 4219
Червинский Михаил
E-mail: cmv.spb@compel.ru

Компэл
www.compel.ru

Мартин Штойр (Maxim Integrated)

БЕСПРОВОДНЫЕ СИСТЕМЫ – ЧТО НУЖНО УЧЕСТЬ ПРИ РАЗРАБОТКЕ?



Процесс разработки беспроводной системы может вылиться в достаточно большую и комплексную работу, требующую учета многих факторов. Однако, при разумном подходе, данный процесс можно упростить. Данная статья затрагивает основные вопросы, возникающие при разработке беспроводных систем и приложений для них. Основное внимание уделено общим вопросам разработки беспроводных систем нелицензируемого ISM-диапазона, в частности, вопросам выбора частотного диапазона, одно- или двунаправленного обмена данными, выбора метода модуляции сигнала, стоимости системы, выбора антенн, влиянию источников питания, радиусу действия сети и протоколов ее работы.

Почему разработчики предпочитают работать в диапазоне 868/915 (в РФ 915 является закрытой частотой – прим. переводчика) МГц по сравнению с диапазоном 433,93 МГц? Иными словами – почему вы выбираете именно те частоты, которые вы используете? Ответ может быть обоснован как минимум двумя соображениями: или данный тип приложений традиционно использует данный частотный диапазон, или же разработчик должен взвесить все аспекты работы приложения и уже после этого сделать выбор в пользу того или иного частотного диапазона (рисунок 1).

Безусловно, одним из наиболее важных вопросов при создании беспроводной системы является выбор ее частотного диапазона. Ответ на вопрос «какой частотный диапазон лучше?» может стать проще, если требования к антенне и ее размещению не являются жесткими, между узлами системы нет препятствий, устройство подключено к линейному источнику напряжения. Но, к примеру, если речь идет о системе для бытовых нужд, то вполне вероятно, что ее узлы имеют скрытую антенну (возможно размещение в стенах, потолках или фальш-панелях), и период автономной работы от батареек невысокой емкости типа CR2032 составляет несколько лет. Тогда именно эти параметры будут определять выбор частотного диапазона и элементной базы для узлов системы.

Как правило, более низкочастотные системы обеспечивают большую возможную дальность связи между узлами и менее зависимы от наличия препятствий или требований прямой видимости

между ними, но на практике более важную роль часто играют другие параметры. К примеру, геометрические размеры антенны, ее диаграмма направленности, работа в условиях реального окружения (препятствий оказывается меньше, чем в условиях планирования наихудшего варианта), влияние шумов, в том числе соседних радиочастотных систем, оказывают более сильное влияние на выбор частотного диапазона, чем просто дальность связи.

Какова должна быть выходная мощность передатчиков? Какие ограничения следует учитывать (к примеру, коэффициент гармоник)?

Высокая выходная мощность передатчика может в ряде случаев компенсировать некоторые недостатки в системе. Однако, она ограничена и возможностями источников питания, и регламентирующими документами. Очень часто приходится увеличивать мощ-

ность передатчика, чтобы скомпенсировать потери в антенном тракте.

(Для более детального рассмотрения путей потерь распространения см. AN3945 «Path Loss in Remote Keyless Entry Systems». Информацию об оценке и планировании диапазона для расчета бюджета канала можно посмотреть в документе AN5125 «Radio Link-Budget Calculations for ISM-RF Products», а также документах, упомянутых в нем).

Одно- или двунаправленная связь

Существует большое количество приложений, в которых достаточно однонаправленной передачи данных. К примеру, действия типа разблокирования дверей автомобиля или открытия окна в комнате могут не требовать подтверждения их выполнения. Следовательно, для этих случаев возможно применение более дешевых компонентов, обеспечивающих только прием или только передачу данных. Но, несмотря на то, что однонаправленные радиосистемы востребованы на рынке, потребность в двунаправленной передаче данных для мониторинга состояния, осуществления обратной связи, отображения статуса пользователя постоянно возрастает. Существует тенденция развития однонаправленных систем для перехода к двунаправленной передаче данных. Так, при эксплуатации бесконтактных автомобильных ключей или систем доступа пользователю может быть важно удо-

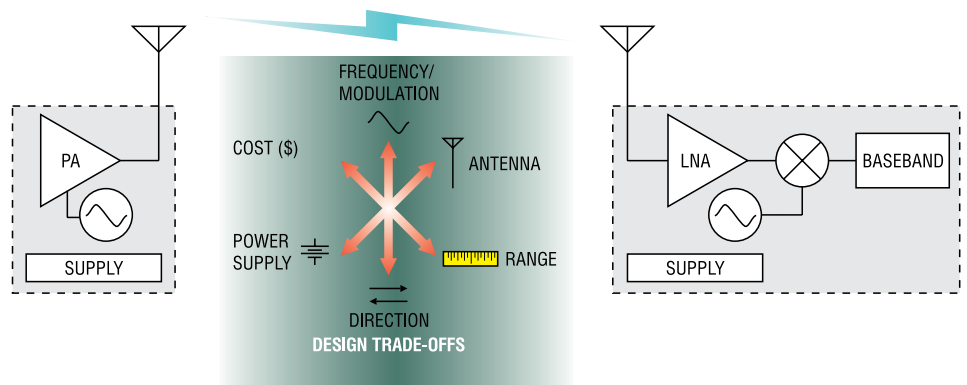


Рис. 1. Основные аспекты выбора частотного диапазона при разработке беспроводных систем

Таблица 1. Геометрические параметры антенн

Частота, МГц	Длина волны, λ, м	Размер четвертьволнового монополя, см (свободное пространство)	Размер четвертьволнового монополя, см (на текстолите FR4)	Эффективная площадь	Ближняя зона (Reactive Near Field), см	Дальняя зона, м
260	1,153	28,83	16,72	1058	18,35	2,31
300	0,9993	24,98	14,49	795	15,90	2,00
315	0,9517	23,79	13,80	721	15,15	1,90
330	0,9085	22,71	13,17	657	14,46	1,82
434	0,6907	17,27	10,02	380	10,99	1,38
435	0,6892	17,23	9,99	378	10,97	1,38
470	0,6379	15,95	9,25	324	10,15	1,28
868	0,3454	8,63	5,01	95	5,50	0,691
902	0,3324	8,31	4,82	88	5,29	0,665
915	0,3276	8,19	4,75	85	5,21	0,655
928	0,3231	8,08	4,68	83	5,14	0,646

Таблица 2. Токи потребления транзисторов Maxim

Наименование	Модуляция	Ток в режиме передачи, мА (315 МГц)	Ток в режиме передачи, мА (434 МГц)	Ток в режиме передачи, мА (915 МГц)	Ток потребления в спящем режиме, мкА
MAX1472	ASK	9,1	9,6	—	0,005
MAX1479	ASK	6,7*	7,3*	—	0,0002
	FSK	10,5*	11,4*	—	
MAX7032	ASK/ FSK	<12,5*	<6,7	—	<0,8
MAX7044	ASK	7,7**	8,0**	—	0,04
MAX7049	ASK	16*	16*	16*, 27***	<0,35
	FSK	21*	21*	21*, 41***	
MAX7057	ASK	8,1*	8,5*	—	<1,0
	FSK	12,2*	12,4*	—	
MAX7058	ASK	8,0*	8,3* (390 МГц)	—	<1,0
MAX7060	ASK	12,5*	14,2*	—	<0,05
	FSK	19*	25*	—	

Напряжение питания 3,0 В, длительность рабочего цикла при ASK 50%.

- * — при выходной мощности +10 дБм;
- ** — при выходной мощности +13 дБм;
- *** — при выходной мощности +15 дБм.

Таблица 3. Основные параметры батарей различных технологий

Тип батареи	Технология	Номинальное напряжение, В	Емкость, мАч	Диаметр/толщина, мм	Вес, г
A27	Алкалиновая	12*	22	8,0/28	4,4
394	Оксид серебра	1,55	63	9,4/3,5	1,1
A312	Цинково-воздушная	1,4	160	7,9/0,5	3,6
CR2032	Литиевая	3,0	225	20/3,2	2,9
CR2450	Литиевая	3,0	620	24,5/5,0	6,8
CR3032	Литиевая	3,0	500	30/3,2	6,8
CR2	Литиевая	3,0	850	15,6/27,0	11
AAA	Алкалиновая	1,5	1000	10/44	11
AAA	NiCd	1,2	250+	10/44	9,5
AAA	NiMH	1,2	550+	10,5/44	13
9V	Алкалиновая	9**	550	25,5 x 16,5 x 46	46
AA	Алкалиновая	1,5	2500	14/50	23
AA	NiCd	1,2	600+	14/50	22,7
AA	NiMH	1,2	1500+	14,5/50	26
CGR18650	Li-Ion	3,6	2250	18,6/65	45
C	Алкалиновая	1,5	7+ Ач	25/49	70
D	Алкалиновая	1,5	16+ Ач	34/60	141
Автомобильные аккумуляторы	Свинцово-кислотные	12**	40+ Ач	различные	различные

- * — набор из 12 ячеек;
- ** — 6 ячеек.

Таблица 4. Скорости саморазряда батарей различных типов

Технология	Анод	Катод	Электролит	Скорость саморазряда (%/месяц)
Литиевая	Li	MnO ₂	LiClO ₄	<0,08
Алкалиновая	Zn	MnO ₂	KOH	<0,17
Оксид серебра	Zn	Ag ₂ O	NaOH/KOH	<0,17
Li-ion	LiCoO ₂	LiC ₆	Li Salt (var)	2...3
Свинцово-кислотные	PbO ₂	PbO ₂	H ₂ SO ₄	~6
Цинково-воздушные	Zn	O ₂	Zn	~8 (exposed)
NiCd	NiOOH	Cd	KOH	15...20
NiMH	NiOOH	(var)	KOH	~30

стовериться в срабатывании механизма замка двери, в случае с автоматическим открыванием окна может возникнуть необходимость в регулировке степени его открытия или потребуются узнать температуру в проветриваемом помещении. Во всех случаях потребуются переход к двунаправленной передаче данных.

Модуляция

Существует множество методов модуляции, которые можно применить для передачи данных в ISM-диапазоне. Благодаря относительной простоте и дешевизне реализации разработчики тяготеют к использованию амплитудной модуляции (ASK) в низкочастотных диапазонах (<470 МГц). Частотная манипуляция в НЧ-системах получила путевку в жизнь с развитием систем контроля давления в шинах (*tire-pressure-monitoring system* – TPMS) – обнаружилось, что они менее восприимчивы к условиям работы (вращение колеса создавало дополнительную амплитудную модуляцию). Любой АМ-детектор использует линейный метод демодуляции сигнала, и, соответственно, достаточно чувствителен к шумам. Частотная модуляция обеспечивает лучшее соотношение сигнал-шум, но при более широкой полосе спектра (типичное значение ~200 кГц). Тем не менее, для частотной модуляции характерна достаточно быстрая потеря несущей при снижении уровня полезного сигнала ниже определенного порога.

Частотная манипуляция (FSK) используется в более высокочастотных

Таблица 5. Возможности передатчиков ISM диапазона от Maxim

Наименование	Полоса частот, МГц	Выходная мощность, дБм
MAX1472	300...450	10
MAX1479	300...450	10
MAX7032	300...450	10
MAX7044	300...450	13
MAX7049	288...945	15 (настраиваемая)
MAX7057	300...450	10
MAX7058	315/390 (300...450)	10
MAX7060	280...450	10, 14*

* – напряжение питания 5 В.

Мощность указана для нагрузки 50 Ом и включает потери на фильтрацию гармоник.

диапазонах (>470 МГц). Работа передатчика в режиме частотной модуляции позволяет формировать непрерывный сигнал, свободный от эффектов, возникающих при включении/выключении ВЧ-усилителя в процессе формирования ASK- или OOK-сигнала. В диапазонах свыше 1 ГГц для борьбы с шумами применяются более сложные методы модуляции, в основном из-за проблемы загруженности данных частот. Это, в свою очередь, требует применения более качественных фильтров, формирующих требуемую полосу частот при приеме или передаче сигналов.

Стоимость решения

Еще одним фактором при разработке беспроводных систем является невысокая стоимость системы при сохранении ее надежности. Большинство предлагаемых компанией Maxim Integrated микросхем для беспроводных приложений выпускаются в компактных кор-

пусах, требуют всего нескольких дополнительных внешних компонентов и значительно экономят место на плате. Схемы включений трансмиттеров достаточно просты – они имеют небольшое количество выводов, а внешние пассивные компоненты необходимы лишь для согласования импеданса антенны и выходных каскадов приемо-передатчика (плюс развязывающие конденсаторы). Приемники, как правило, также имеют небольшой список требуемых компонентов обвязки, позволяя снизить стоимость конечного решения, и, в то же время, обеспечивая разработчику достаточную гибкость в решениях. Радиомикросхемы с обвязкой легко размещаются на двусторонней печатной плате небольшой площади.

Кроме стоимости печатной платы, размещаемых на ней компонентов и монтажа, необходимы будут еще антенна и источник питания (для узлов с автономным питанием).

Таблица 6. Чувствительность приемников Maxim для различных частотных диапазонов

Наименование	Режим модуляции	Чувствительность приемника, 315МГц, дБм	Чувствительность приемника, 434МГц, дБм
MAX1470	ASK	-115	-110
MAX1471	ASK	-116	-115
	FSK	-109	-108
MAX1473	ASK	-118	-116
MAX7032	ASK	-114	-113
	FSK	-110	-107
MAX7033	ASK	-118	-116
MAX7034	ASK	-114	-113
MAX7036	ASK	-109	-107
MAX7042	FSK	-107	-106

Антенна

Физические параметры антенны, такие как ее тип, размер, геометрия, расположение, важны при разработке беспроводной системы и имеют большое влияние на эффективность ее работы в целом. Форм-фактор конечного изделия важен при разработке системы для любого из приложений ISM-диапазона и может повлиять на выбор частотного диапазона.

Антенны могут иметь различную форму и тип, начиная от простых $1/4$ монополей и полуволновых диполей — до петлевых, F-образных и пр. Также существует разделение антенн на электрические и магнитные, в зависимости от того, с какой компонентой электромагнитного поля они работают. Разработка и конструирование антенн сами по себе являются искусством.

Первым шагом при выборе антенны является определение ее максимальных размеров, допустимых для данного конкретного приложения — возможно ли будет ограничиться печатной антенной или антенной, расположенной в корпусе устройства, или же необходимо подключение внешней. В таблице 1 представлены некоторые геометрические и эксплуатационные характеристики для оценки параметров антенн на различные рабочие частоты.

Печатные антенны на текстолите FR4 имеют размер примерно 0,58 от аналогичных в свободном пространстве за счет диэлектрической проницаемости материала, ближняя зона оценивается как $\lambda/2\pi$, дальняя зона 2λ , апертура приведена для изотропной антенны — $\lambda^2/4\pi$.

Из таблицы 1 видно, что антенны с меньшими размерами лучше применять на более высоких частотах. Однако есть ограничения: при уменьшении линейных размеров антенны уменьшается ее апертура. Меньшая апертура в свою очередь приводит к уменьшению излучаемой энергии.

При выборе антенны следует помнить о следующих простых правилах:

- диэлектрический материал подложки антенны сокращает ее эффективную длину;
- петлевые антенны генерируют магнитное поле, в то время как вибраторные антенны — электрическое;
- магнитные антенны менее чувствительны к наличию объектов в ближней зоне (пример — рука в случае устройства дистанционного управления);
- расположение и ориентация «земли» антенны может сильно повлиять на ее диаграмму направленности.

Более детально вопросы выбора и параметры антенн ISM-диапазона рассмотрены в документах:

- Application Note 3401, «Matching Maxim's 300MHz to 450MHz Transmitters to Small Loop Antennas,»

- Application Note 3621, «Small Loop Antennas: Part 1 — Simulations and Applied Theory,»

- Application Note 4302, «Small Antennas for 300MHz to 450MHz Transmitters.»

Питание

В зависимости от конкретного приложения источники и способы питания узлов беспроводной системы могут различаться. Основные их типы — следующие:

- стационарное питание от преобразователя, подключенного к сети переменного тока;
- автомобильные аккумуляторы (12/24 В) и шины питания (5 В);
- литиевые батареи и аккумуляторы (3 В);
- щелочные батареи (1,5 В);
- никелевые аккумуляторы (1,2 В);
- устройства сбора энергии (energy-harvested sources) и др.

В общем случае передатчик может запитываться от источника энергии одного типа, а приемник от другого (3 В литиевой батарейки у передатчика и 5 В питания автомобильной электроники у приемника).

Одним из основных вопросов при эксплуатации беспроводных систем с автономным питанием является время автономной работы узла без смены источника питания в зависимости от выходной мощности передатчика (или трансивера). Общей рекомендацией при работе от батарейных источников питания является применение эффективных передатчиков и приемников с высокой чувствительностью в сочетании с адаптированным протоколом обмена данными и режимами работы. Срок службы батареи должен учитываться во всех режимах работы системы — время запуска радиочастотной схемы, время и режим работы микроконтроллера, длительности включенного/выключенного состояний, эффективность работы усилителя мощности, потребление в режиме прослушивания каналов, токи в спящем режиме и пр.

Компоненты Maxim для построения радиоканала обладают одним из самых малых токов потребления среди аналогичных приборов, представленных на рынке. В таблице 2 представлены токи потребления трансмиттеров Maxim в различных режимах и при различных рабочих частотах.

В среднем трансмиттеры в режиме FSK-модуляции имеют ток потребления несколько больший по сравнению с режимами ASK-модуляции вследствие того, что на выходе поддерживается постоянный уровень сигнала без периодов выключения, характерных для ASK. Знание тока потребления полезно при оценке времени работы батареи

при известной ее емкости. Производители батарей указывают на них соответствующую информацию в совокупности с информацией о линейных размерах и весе (таблица 3).

Еще одним важным параметром, определяющим срок службы батареи, является ток саморазряда или период саморазряда.

Скорости саморазряда для основных типов батарей, наиболее часто применяемых в узлах сетей ISM-диапазона, представлены в таблице 4.

Литиевые батареи являются наиболее популярными в небольших бытовых устройствах благодаря их компактным размерам и длительному времени службы (низкий саморазряд). Критериями выбора батарей являются скорость разряда, рабочий диапазон температур и диапазон температур хранения. Даже если батарея способна в течение длительного периода эксплуатации сохранять стабильное выходное напряжение, в каждой технологии наступает момент деградации, связанный с увеличением внутреннего сопротивления батареи. Эта деградация часто используется для определения минимального напряжения питания радиочастотной схемы. Как правило, при достижении литиевой батареей 90% от номинального напряжения ее нагрузочная способность падает до критического уровня.

К примеру, когда литиевая батарея типа CR2032 имеет наработку 200 мАч, ее внутреннее сопротивление практически удваивается — с 15 до 30 Ом, выходное напряжение падает с 3 до 2,8 В. При наработке порядка 225 мАч внутреннее сопротивление возрастает до 50 Ом, а напряжение падает до 2,3 В, а при 240 мА оно составит уже величину порядка 120 Ом при снижении выходного напряжения до 1,5...1,8 В. Таким образом, падение напряжения со временем не так важно для питания системы, как потеря емкости батареи.

Радиус действия

Максимально допустимое расстояние взаимодействия между узлами беспроводной системы зависит от целого ряда факторов: рабочая частота, выходная мощность передатчика, эффективность антенн, чувствительности приемника. Препятствия, перемещение объектов или узлов и даже атмосферные условия могут оказать существенное влияние на предельное расстояние между узлами или на качество связи между ними, однако это находится вне контроля разработчика беспроводной системы (хотя в ряде случаев приходится учитывать и данные факторы). Обычно разработчики ограничиваются определением необходимой выходной мощности, чувствительности приемника, а также выбором антенны.

Таблица 7. Основные типы областей применения беспроводных систем ISM-диапазона

Область применения		Характер обмена	Частотный диапазон, МГц	Метод модуляции	Примечания
Автомобильные системы	Центральный замок в дистанционном управлении (RKE)	Однонаправленная передача данных	315, 434	ASK	В последнее время идет тенденция к наличию обратной связи – двусторонний обмен данными
	Пассивный бесконтактный центральный замок (PKE)	Двунаправленный обмен	0,125; 13,56	ASK	—
	Системы мониторинга давления шин (TPMS)	Однонаправленная передача данных	315, 434	FSK	—
	Открытие ворот (GDO)	Однонаправленная передача данных	315, 390	ASK	В ряде районов США частота 390 МГц используется военными, в данных случаях применяется диапазон 315 МГц
	Автоматические системы взимания платы за проезд (ETC) и автоматической идентификации автотранспорта (AVI)	Однонаправленная передача данных	—	—	—
	Беспроводные системы сбора данных	Однонаправленная передача данных	315, 434	ASK	Мониторинг условий эксплуатации, характера движения и т.д.
Автоматическое считывание показаний счетчиков (AMR)	Водные счетчики	Однонаправленная передача данных	470, 868, 915	FSK	AMR является развивающейся областью автоматизации для крупных энергетических компаний производителей счетчиков. Применяется в сетях датчиков (HAN, NAN, сеть типа mesh)
	Счетчики расхода газа	Однонаправленная передача данных	868, 915	FSK	—
	Электросчетчики	Двунаправленный обмен	868, 915	FSK	Часто используется для централизованного сбора показаний по дому или подъезду
Домашняя автоматика (HA)	Системы беспроводного управления	Однонаправленная передача данных	434	ASK, FSK	Замещение ИК управления, аудио-, видеосистемы, системы ДУ в пределах нескольких помещений, телеметрия
	Освещение	Однонаправленная передача данных	390, 418, 434	ASK	Настройка освещения
	Управление двигателями	Однонаправленная передача данных	434	ASK	Управление сценическими прожекторами, задвижками, координация с системами вентиляции и кондиционирования
	Охранно-пожарные системы	Однонаправленная передача данных; Двунаправленный обмен	345, 434	ASK	—
	Открытие дверей/ворот	Однонаправленная передача данных	315, 390	ASK	Открытие дверей, контроль безопасности
	Системы генерации/аккумуляции тепла	Однонаправленная передача данных	—	—	—
	Управление энергопотреблением	Двунаправленный обмен	—	—	Программируемые термостаты, устройства отображения потребленной мощности
	Контроль климата в помещении	Однонаправленная передача данных	—	—	Распределенные датчики
RFID	Отслеживание товаров	Двунаправленный обмен	915, 2450, 5800	ASK, FSK, BPSK	—
	Железнодорожные грузоперевозки	Двунаправленный обмен	915, 2450, 5800	ASK, FSK, BPSK	—
Беспроводные сети	Bluetooth LE	Двунаправленный обмен	2450	FHSS	IEEE 802.15.1
	Wi-Fi	Двунаправленный обмен	2450, 5000	DSSS, FHSS, OFDM	IEEE 802.11
Мониторинг перемещения животных	Земля/вода/воздух	Однонаправленная передача данных	410	PSK	Спутниковая система ARGOS

Выходная мощность передатчика может вносить наибольший вклад в радиус действия системы. Довольно часто для компенсации малой эффективности антенны (например, в случае, если размеры антенны меньше, чем четверть длины волны) используют повышение мощности передатчика сверх разрешенного предела, особенно в низкочастотных системах, где эффективность антенны может быть даже менее 10% (например, в беспроводных ключах). Тем не менее, важно не превышать установленную для данного диапазона выходную мощность. Большие мощности могут быть применены в случае,

если рабочий цикл передатчика соответствует установленным нормам.

Основные моменты при выборе выходного усилителя мощности для системы:

- более высоким выходным мощностям соответствует более высокий ток потребления;
- энергозатраты на работу в более высоких частотах будут больше (в основном из-за работы ФАПЧ-генератора);
- повышению выходной мощности препятствуют ограничения на максимально разрешенную для данного диапазона выходную мощность, занимаемую полосу частот, коэффициент гармоник.

На приемной стороне системы чувствительность приемника играет определяющую роль в увеличении дистанции связи. Как и в случае передатчика, высокая чувствительность приемника может помочь скомпенсировать низкую эффективность антенн или плохие условия приема.

При выборе приемника руководствуются следующими правилами:

- обычно чувствительность приемника для ASK модуляции выше;
- приемники, как правило, демонстрируют лучшую чувствительность на более низких частотах;
- скорость передачи данных также влияет на чувствительность приемника —

Таблица 8. Основные приоритетные задачи и типовые пути их решения

Приоритет	Частотный диапазон	Модуляция	Примечания	Компромиссы
Дальность связи	Нижний, средний	ASK	Полноразмерные антенны, работа на более низких частотах, ASK-модуляция, в диапазоне средних частот разрешены большие выходные мощности.	Стоимость решения, время жизни батареи, простота, прямая видимость, скорость передачи данных, борьба с интерференционными помехами
Стоимость	Нижний	ASK	Небольшие и простые схемы. Предпочтительнее ASK-модуляция. ASK-трансиверы имеют более простые схемы включения.	Дальность связи, время жизни батареи, скорость передачи данных, борьба с интерференционными помехами, совместимость
Время жизни батареи	Нижний	ASK	Токи потребления микросхем оперирующих на более низких частотах ниже, ASK-модуляция требует меньших затрат энергии, чем FSK	Дальность связи, стоимость, прямая видимость, простота, скорость передачи данных, борьба с интерференционными помехами
Размеры	Средний	—	Если в размер входят размеры антенны, тогда предпочтительнее диапазон 868/915 МГц, при котором размер антенн минимален. В иных случаях вопросы стоимости могут быть приоритетнее.	Дальность связи, стоимость, прямая видимость
Прямая видимость (LOS)/преграды	Нижний	FSK	Волны низких частот менее подвержены влиянию препятствий и затуханию при прохождении сплошных препятствий. FSK-модуляция менее чувствительна к паразитной амплитудной модуляции (например из-за вращения) и более устойчива к интерференции сигнала из-за многолучевого распространения.	Время жизни батареи, размеры
Простота	Нижний	ASK	Реализация ASK-модуляции проще. Более длинные волны менее чувствительны к влиянию формы печатной платы, размерам компонентов.	Дальность связи, время жизни батареи, скорость передачи данных, интерференция, совместимость
Скорость передачи данных	Верхний	FSK, PSK, расширение спектра	Более высокие скорости передачи данных требуют более широкой полосы частот. Высокие скорости передачи, высокие частоты и расширение спектра приводят к повышению рабочего тока. Уменьшение эффективной площади антенн и расширение полосы частот негативно сказываются на дальности связи.	Дальность связи, стоимость, время жизни батареи, простота
Подавление помех	Средний, верхний	Расширение спектра	Расширение спектра позволяет эффективно подавлять несущие частоты. Широкая полоса частот для работы доступна на более высоких частотах.	Дальность связи, стоимость, время жизни батареи, простота
Частотная совместимость	Нижний	—	Более важна на высоких частотах. Узкие фильтры подавления помех позволяют улучшить чувствительность и расширить дальность связи, аналогично в случае применения более точных тактовых генераторов на нижних частотах (однако это повышает стоимость решения).	Стоимость, простота

обычно для более низких скоростей чувствительность приемника более высокая.

В таблице 6 представлена чувствительность приемников Maxim для различных частотных диапазонов.

Все данные, представленные в таблице 6, даны для средней мощности сигнала. Чувствительность по средней мощности несущей будет на 3 дБм ниже, по пиковой мощности на 3 дБм выше.

Протоколы

Выбор протокола для приложения может быть или финальным этапом при разработке системы, или же начальным, в зависимости от характера приложения. Протоколы определяют порядок обмена данными между узлами, структуру передаваемых данных, способы кодирования, процедуры установления соединения и методы доступа к среде передачи. Для выбора доступно множество стандартизованных протоколов, а также множество проприетарных. Одним из критериев выбора является необходимость одно- или двунаправленного обмена данными. Безусловно, протоколы для обеспечения двунаправленной связи сложнее из-за необходимости отслеживания состояния среды передачи для предотвращения коллизий.

Основные приложения

Все разнообразие приложений беспроводных систем можно объединить в

несколько групп по характеру обмена данными, типу используемой модуляции, общим требованиям или ограничениям. В таблице 7 обобщены основные типы областей применения беспроводных систем ISM-диапазона, основные требования к ним, частоты и виды модуляции.

Приоритеты и решения

Каждая область применений, рынок или приложение ставят свои приоритеты, определяющие путь разработки и развития системы. В таблице 8 представлены основные приоритетные задачи, с которыми сталкиваются разработчики беспроводных систем.

Заключение

Все микросхемы, предлагаемые компанией Maxim Integrated для ISM-диапазона, имеют в документации типовые схемы включения, позволяющие быстро начать разработку системы. Как правило, для приемопередатчиков и передатчиков необходимо несколько внешних компонентов — микроконтроллер или иное устройство управления, развязывающие конденсаторы, цепи согласования с антенной, стабилизатор питания. Для приемников — компоненты для задания нужного частотного диапазона, источник питания и контроллер, принимающий данные. В документации также отражены основные требования и реко-

мендации по подготовке печатных плат. Более подробно с данными вопросами можно ознакомиться в документах:

- Tutorials 4636, «Avoid PC-Layout 'Gotchas' in ISM-RF Products» ;
- Tutorials 5100, «General Layout Guidelines for RF and Mixed-Signal PCBs».

Дополнительная информация по передатчикам Maxim отражена в документах:

- Application note 1954, «Designing Output-Matching Networks for the MAX1472 ASK Transmitter»
- Application note 3401, «Matching Maxim's 300MHz to 450MHz Transmitters to Small Loop Antennas»;

По приемникам:

- Application note 1017, «How to Choose a Quartz Crystal Oscillator for the MAX1470 Superhetrodyne Receiver»
- Application note 1830, «How to Tune and Antenna Match the MAX1470 Circuit»
- Application note 3671, «Data Slicing Techniques for UHF ASK Receivers».

Все упомянутые в тексте документы доступны на официальном сайте Maxim — <http://www.maximintegrated.com/>.

Получение технической информации, заказ образцов, поставка — e-mail: analog.vesti@compel.ru

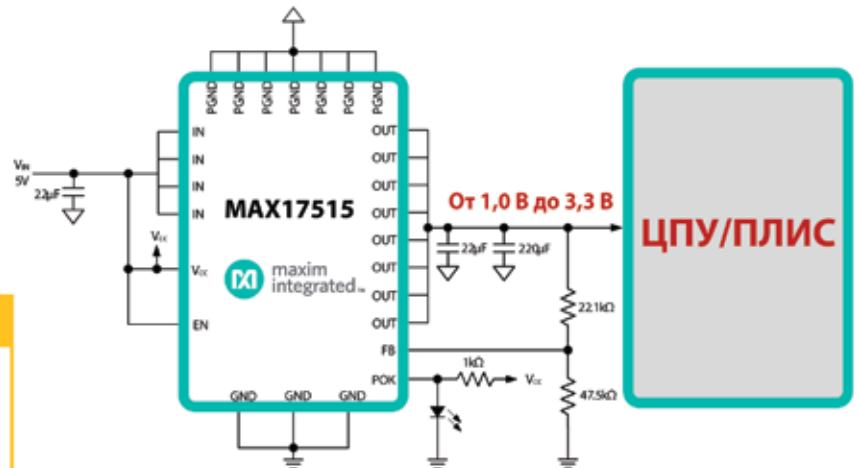


MAX17515 Модуль питания для высокопроизводительных систем



Преимущества

- Не требует внешних компонентов
- Простота использования
- Высокая эффективность (КПД до 94%)
- Высокий уровень защиты
- Вывод сигнала «Power Good»
- Удобный корпус SIP 6,5 × 2,8 мм
- Соответствует стандарту EN55022B и CISPR-22 класс B



Логотип Maxim Integrated — торговая марка Maxim Integrated Products, Inc.

Москва
Тел.: (495) 234-7764, доб. 2328
Соколов Андрей
E-mail: a.sokolov@compel.ru

Санкт-Петербург
Тел.: (812) 327-9403, доб. 4219
Червинский Михаил
E-mail: cmv.spb@compel.ru

Компэл
www.compel.ru

Павел Трибунский (г. Москва) ВСЕ, ЧТО ОКРУЖАЕТ ПЛИС – ПОСТАВЛЯЕТ MAXIM!



Сложно переоценить роль **программируемых логических интегральных схем (ПЛИС)** в современной цифровой схемотехнике. ПЛИС применяются при разработке и отладке процессоров, специализированных цифровых микросхем, алгоритмов цифровой обработки сигналов и т.д. Основными (но не единственными) производителями чипов ПЛИС являются компании **Altera** и **Xilinx**. А компания **Maxim Integrated** производит полный спектр «обвязки» для этих ИС.

Программируемые логические устройства (PLD) произвели революцию в мире цифровой схемотехники более чем 25 лет назад, предлагая разработчику пустой чип для его программирования и реализации множества функций. PLD могут иметь низкую плотность (емкость) логических ячеек и называться «сложные программируемые логические схемы» (англ. — complex programmable logic devices, CPLD's), или иметь большую емкость логических ячеек, реализованных на базе статической оперативной памяти с произвольным доступом (SRAM), и называться «программируемыми вентиляльными матрицами» — ПЛИС (англ. — field programmable gate array, FPGA). Вдобавок, помимо реализации логических функций и регистров массива логических элементов, можно использовать такие встроенные функции, как память, управление тактовыми сигналами, драйверы ввода-вывода различных стандартов, трансиверы с высокой скоростью передачи данных, MAC-уровни Ethernet, функциональные блоки сигнальной обработки, а также встраиваемые процессоры.

Применение программируемых логических устройств предполагает ввод, обработку, управление и вывод данных, однако эти функции ограничены областью цифровых сигналов, в то время как реальный мир по своей природе имеет аналоговый характер (температура, давление, звук, зрение, напряжение, ток, частота, и др.). Большая часть данных, распространяющаяся по проводам или радио, имеет аналоговую природу, которая должна быть преобразована в дискретный вид для последующей обработки в ПЛИС. **Maxim Integrated**, как один из мировых лидеров в области производства электронных компонен-

тов, делает аналоговый мир доступным миру цифровому.

С позиции инфраструктуры ПЛИС, Maxim Integrated предлагает решения в таких основных областях как:

- аналого-цифровое преобразование сигналов;
- обработка мультимедийного контента (звук, изображение);
- интерфейсы ввода-вывода данных;
- формирование и распределение тактового сигнала;
- блоки аналоговой обработки сигналов;

- защита интеллектуальной собственности на уровне микропрограмм (программный код, алгоритмы сигнальной обработки) от несанкционированного доступа и копирования;

- мониторинг состояния функциональных узлов в системах с ответственным применением;

- управление питанием (рисунок 1).

Рассмотрим подробнее предлагаемые решения по некоторым из указанных направлений.

Преобразование аналоговых и цифровых сигналов

Мы живем в мире, в котором человек видит, слышит, ощущает запах, вкус, прикосновение. Сигналы реального мира имеют аналоговую природу, и возникает необходимость их преобразования в цифровой вид при помощи АЦП, после чего они могут быть обработаны в ПЛИС. По завершении обработки цифровой сигнал преобразуется

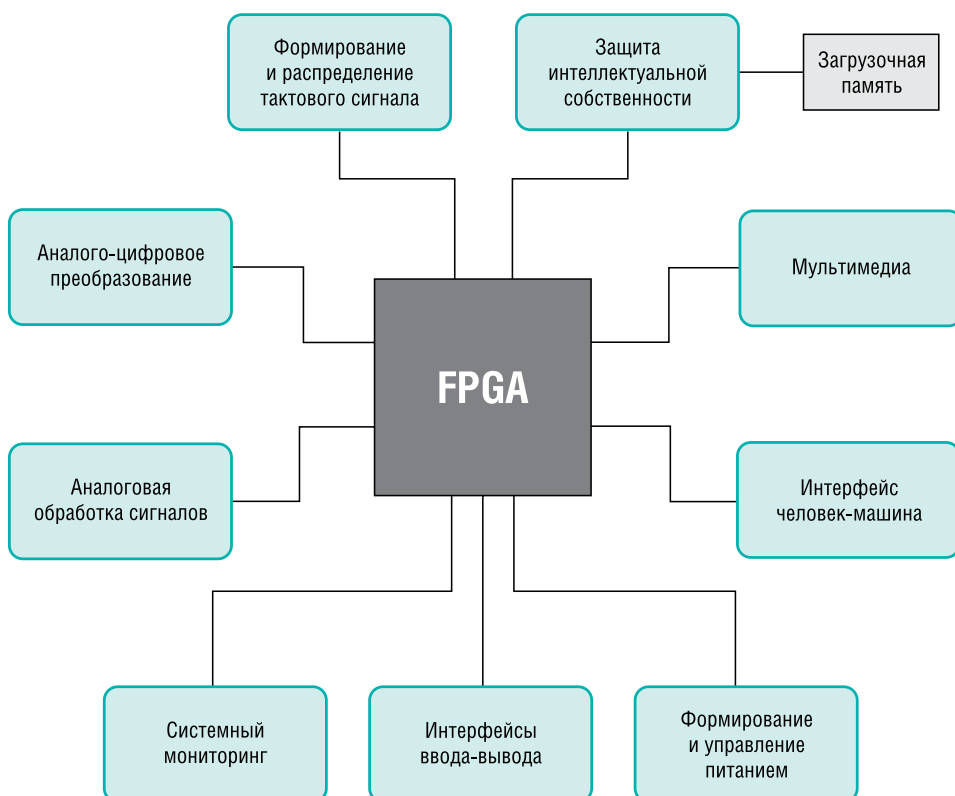


Рис. 1. Периферия ПЛИС

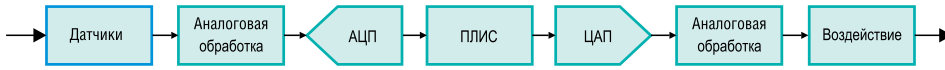


Рис. 2. Типовая цепь обработки аналогового сигнала

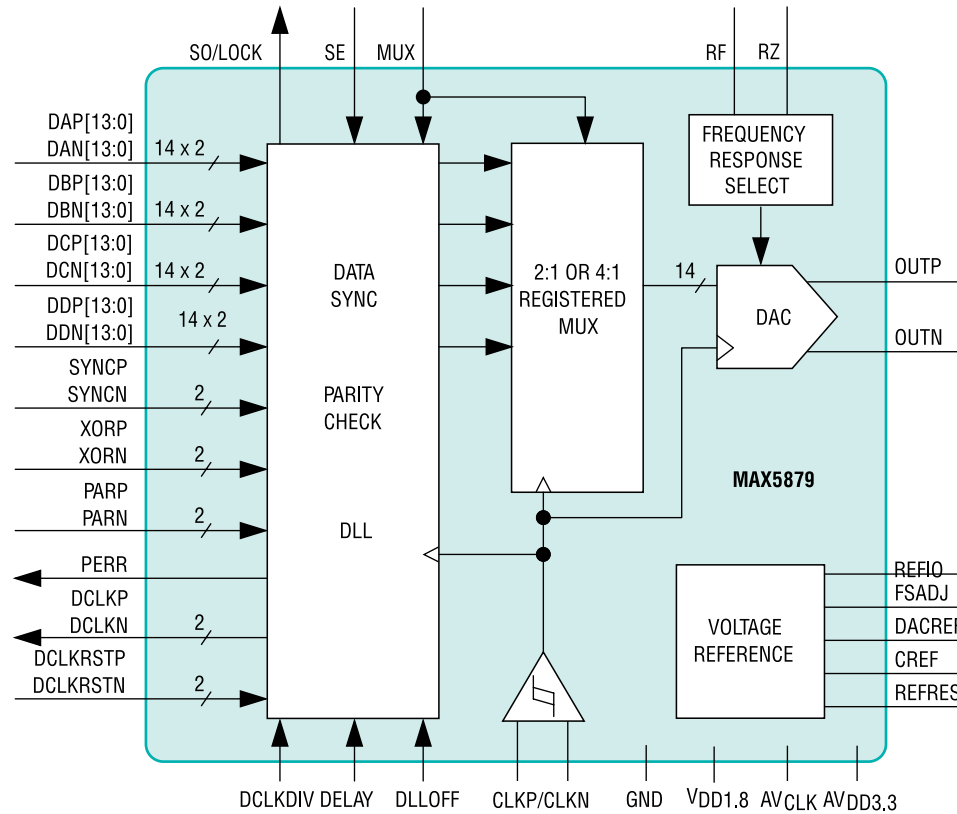


Рис. 3. Внутренняя структура RF DAC MAX5879

обратно в аналоговый вид при помощи ЦАП (рисунок 2). Однако история аналогового сигнала не начинается и не заканчивается на преобразовании, в игру вступают операционные усилители, усилители с программируемым коэффициентом усиления, фильтры, смесители, задача которых заключается в предварительной обработке и постобработке аналогового сигнала. Компания Maxim Integrated предлагает разработчику широкий выбор изделий для решения задачи преобразования аналоговых и цифровых сигналов. Сюда входят различные MEMS-датчики, АЦП и ЦАП с высокой разрядностью и скоростью преобразования.

Принимая решение при выборе АЦП и ЦАП, системный инженер отвечает на вопросы:

- Какой должна быть схема обработки аналогового сигнала, предшествующая АЦП;
- Какова должна быть скорость оцифровки и разрядность АЦП;
- Какие параметры являются критичными.

На веб-сайте компании Maxim Integrated представлены руководства по выбору и применению АЦП и ЦАП.

Отметим некоторые интересные тенденции.

Для систем с квадратурным формированием и обработкой сигнала на видеочастоте, таких как программные радиомодемы (*Software Defined Radio*) с нулевой промежуточной частотой (Zero IF), где необходимо иметь два АЦП в приемнике и два ЦАП в передатчике, Maxim Integrated выпускает микросхемы так называемого Analog Front-End. В одном корпусе комбинируются высокоскоростной сдвоенный АЦП, высокоскоростной сдвоенный ЦАП для формирования и обработки квадратурных I/Q-каналов, а также несколько высокочастотных АЦП и ЦАП последовательного приближения для контроля и регулирования параметров радиочастотного тракта, например — коэффициента усиления приемника. Такое решение позволяет сэкономить стоимость набора дискретных микросхем и место на печатной плате радиомодема.

В сфере беспроводных телекоммуникаций, а также в военной промышленности так называемых радиочастотных АЦП и ЦАП (RF ADC, RF DAC). Этот класс устройств позволяет выполнять преобразование сигнала на частоте семплирования в несколько ГГц. Так, например, микросхема ЦАП **MAX5879** (рисунок 3) позволяет формировать аналоговый сигнал на частоте следования отсчетов до

2,3 ГГц с 14-битным разрешением. В микросхеме встроена система выравнивания задержки фронта сигналов шины данных с тактовым сигналом, что очень важно при использовании предельной скорости формирования отсчетов. Указанная модель ЦАП содержит также систему проверки данных на четность, что позволяет обеспечить мониторинг сбоев шины данных ЦАП со стороны ПЛИС, и систему пережатия данных (скремблер), предотвращающую появление на выходе ЦАП сосредоточенных спектральных составляющих в ситуациях, когда входящий поток данных имеет повторяющуюся структуру.

Еще одна интересная тенденция — применение высокоскоростных АЦП и ЦАП с последовательным интерфейсом. Данное решение направлено на экономии портов ввода-вывода данных со стороны ПЛИС. Современные системы на ПЛИС зачастую требуют применения большого количества IO-сигналов, количество портов ввода-вывода ПЛИС ограничено и может быть недостаточным для решения конкретной задачи. Применение высокоскоростных АЦП и ЦАП с последовательной шиной данных решает эту проблему. Например, микросхема **MAX19527** (рисунок 4) содержит 8 АЦП с разрешением 12 бит и максимальной частотой семплирования 50 МГц. Для каждого АЦП в микросхеме предусмотрен конвертер параллельной шины в последовательную (Serializer), данные от каждого АЦП передаются в ПЛИС по одной дифференциальной паре (LVDS). В результате системный разработчик получает выигрыш — количество физических линий ввода-вывода от восьми АЦП составляет $8 \times 2 = 16$ вместо $8 \times 12 = 96$ в случае применения АЦП с параллельным интерфейсом данных.

Решения для защиты интеллектуальной собственности

Для современных разработчиков доступны ПЛИС, в которых используются различные технологии защиты конфигурационных данных, такие как однократно программируемые (*One-Time-Programmable*) ПЗУ, выполненные по технологии Antifuse, перепрограммируемые ячейки памяти на основе FLASH, конфигурируемые логические ячейки на основе статической памяти (SRAM).

Решения на основе технологий Antifuse и FLASH обеспечивают достаточно высокую защищенность конфигурационных данных, хранящихся внутри чипа ПЛИС и защищают их от считывания. Однако существуют способы, такие как распаковка, считывание данных в момент загрузки, сканирование контраста напряжений электронным лучом, воздействие ионным лучом, направленные на нарушение работы механизмов защиты и извлечение конфигурационных данных. Потенциальный

взломщик может воспользоваться одним из доступных способов и клонировать оригинальную разработку.

В микросхемах ПЛИС класса High-End применяются технологии встроенной криптографической защиты и механизмы идентификации, однако, такие способы неэффективны с точки зрения цены и неприменимы в отраслях, где стоимость решения имеет важное значение, например, на рынке потребительской электроники. Тем не менее, схема защиты интеллектуальной собственности должна быть надежной, простой в применении и иметь минимальное влияние на ресурс ПЛИС (количество используемых портов, потребление) и стоимость всего решения.

Компания Maxim Integrated предлагает решение, основанное на идентификации при помощи аутентификационного кода (*Message Authentication Code*) (рисунок 5). Защитный чип принимает от ПЛИС случайную последовательность данных, производит вычисления и формирует MAC-сообщение, после чего отправляет его в ПЛИС, где сравнивается принятое MAC-сообщение и сформированное внутри ПЛИС по тому же алгоритму шифрования. Если оба кода совпадают, сообщение, принятое от защитного чипа, является достоверным, а идентификация — пройденной успешно.

С точки зрения взломщика будет довольно проблематично записать все возможные отклики защитного чипа с целью их дальнейшего воспроизведения в ответ на случайные последовательности, поступающие от ПЛИС.

Микросхема **DS28E01-100** от компании Maxim Integrated содержит в себе ядро криптографического кодирования, 128 байт пользовательской памяти, секретный ключ для внутреннего использования и уникальный идентификатор без возможности перезаписи (рисунок 6). Однопроводной интерфейс DS28E01-100 уменьшает количество линий связи с ПЛИС до одного проводника, что особенно важно в случаях, когда количество свободных портов ввода-вывода ПЛИС ограничено.

Питание

На сегодняшний день существует два вида программируемых логических устройств:

- программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС, FPGA);
- программируемые логические матрицы (CPLD).

Каждый из них, в зависимости от сложности схемы конечного устройства, а также используемой микросхемы, требует от 3 до 15 каналов питания.

Особенности питания ПЛИС

Современные ПЛИС используют канал питания ядра, который подает пи-

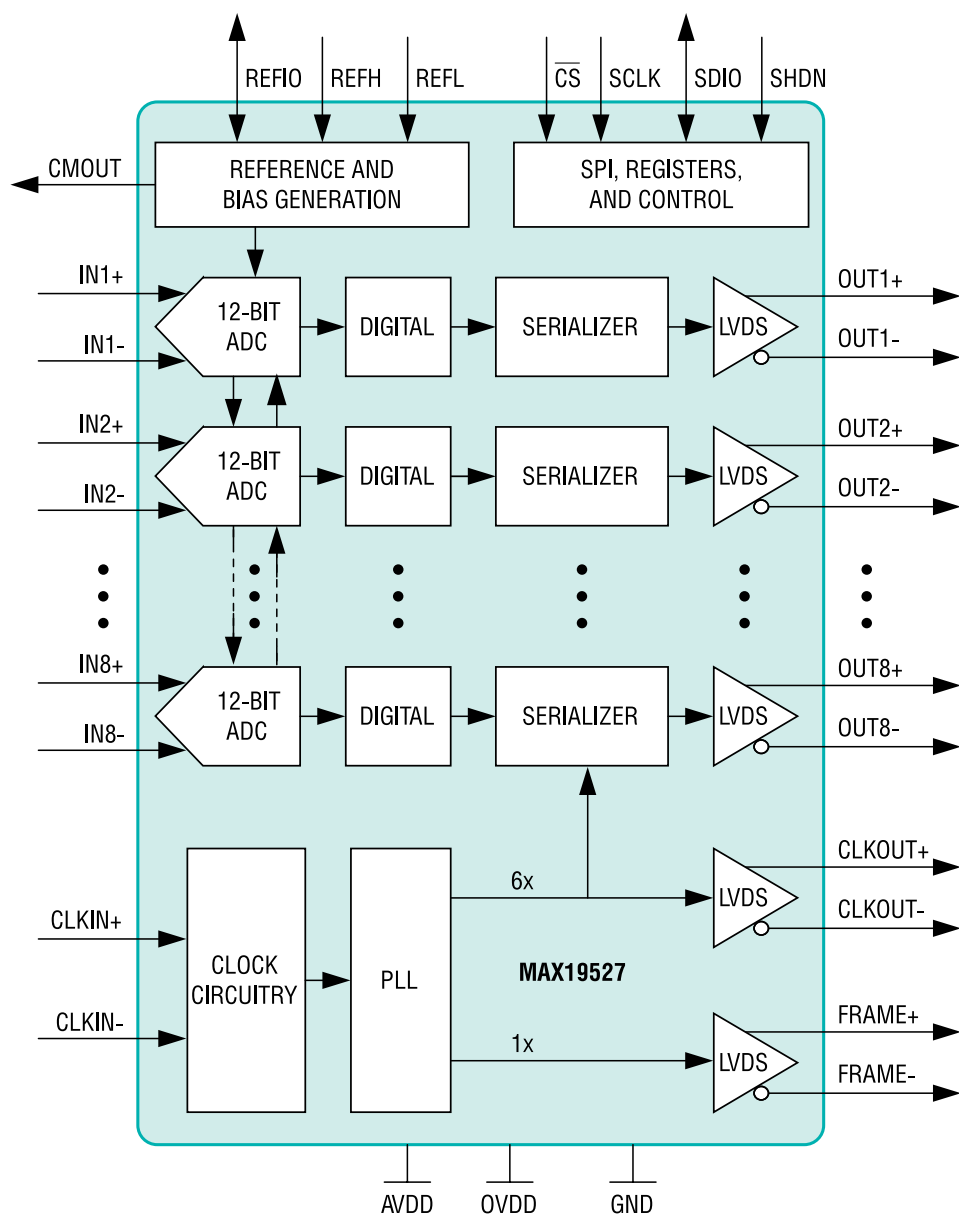


Рис. 4. Внутренняя структура 8-канального АЦП с последовательным интерфейсом MAX19527

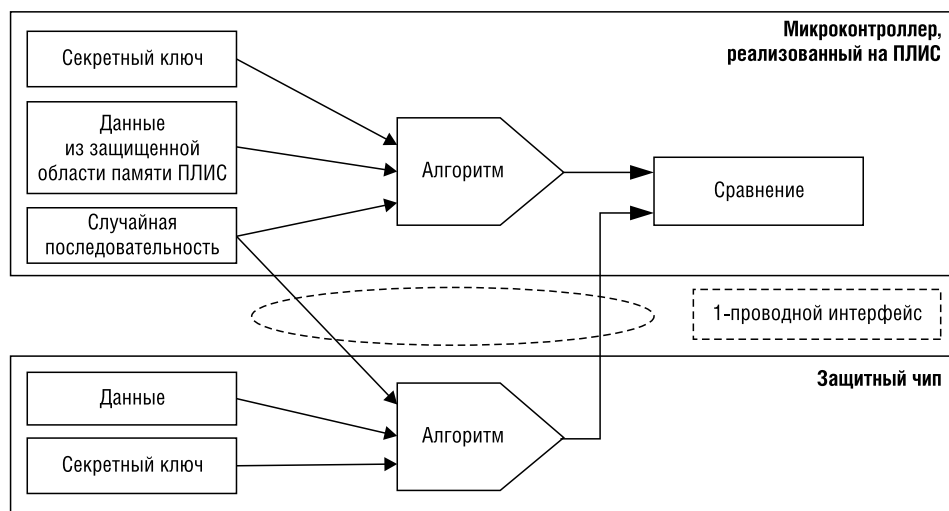


Рис. 5. Принцип действия защитного механизма

тание почти на всю микросхему и имеет наибольшую потребляемую мощность. Переход на каждый новый технологи-

ческий уровень (90 нм > 65 нм > 40 нм) снижает напряжение питания ядра. Внешнее питание подается на конфи-

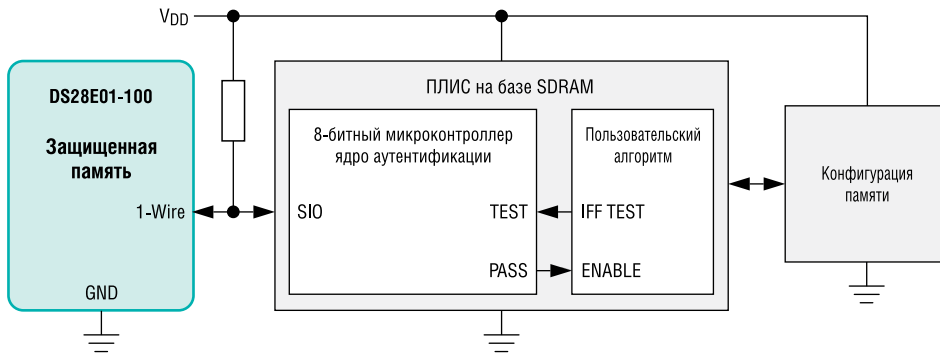


Рис. 6. Решение на базе DS2801-100

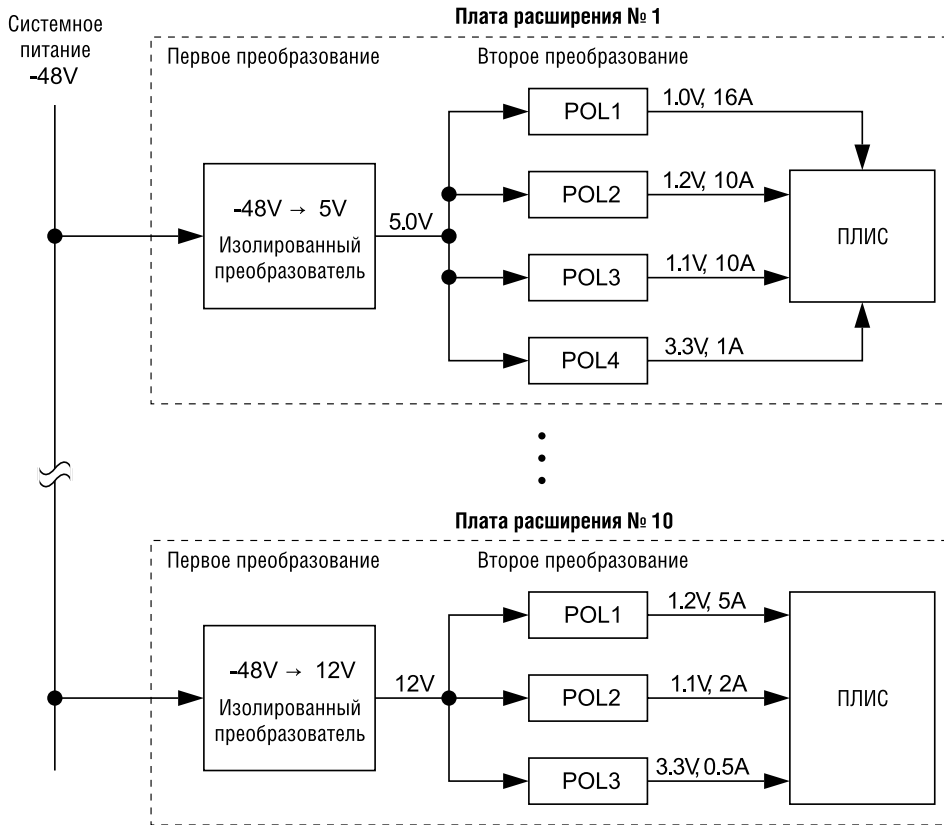


Рис. 7. Пример схемы питания ПЛИС Altera семейства Stratix в телекоммуникационной системе

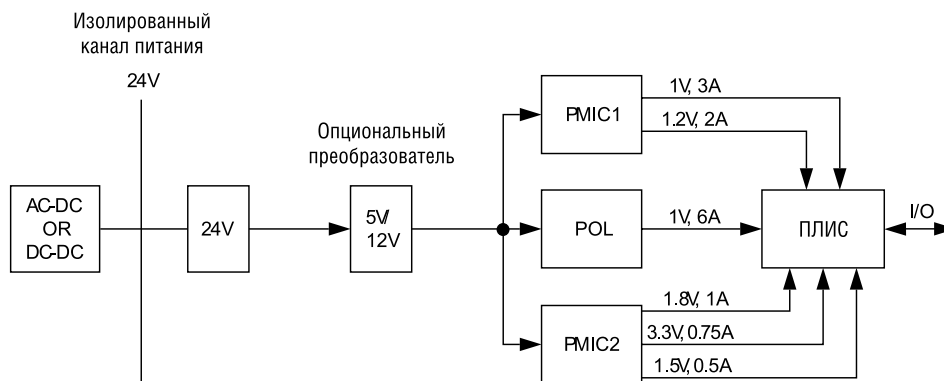


Рис. 8. Пример системы питания ПЛИС Altera Arria в промышленных применениях

гуграционную логику, клок-менеджеры, кроме того, ПЛИС используют для преобразования стандартных интерфейсов, поэтому каждый IO-драйвер может иметь свой собственный канал питания 1,2...3,3 В.

Особое внимание следует уделить питанию высокоскоростных SerDes-преобразователей, работающих со скоростями передачи данных 155 Мбит/с...28 Гбит/с и выше, каждый из которых может потреблять от

источника питания ток от единиц до десятков А.

При разработке системы питания ПЛИС необходимо учесть такие основные моменты, как:

- величина первичного напряжения питания системы;
- требуемое количество каналов питания ПЛИС;
- мощность, потребляемая микросхемой ПЛИС от источника питания;
- КПД каждого из каналов питания;
- очередность включения каналов (секвенсирование (Sequencing));
- обеспечение электромагнитной совместимости (пульсации напряжения, взаимное влияние каналов питания).

Для большинства задач применение отдельных источников для каждого канала питания является непрактичным, поэтому компании Altera и Xilinx выпускают к своим ПЛИС руководства по возможному объединению каналов.

Архитектура системы питания

Архитектура системы питания ПЛИС определяется множеством факторов, например, такими как сфера применения ПЛИС (телекоммуникационное оборудование, вычисления, промышленная автоматизация, мобильные устройства), нагрузочная способность и КПД источника питания, диапазон изменения преобразуемого напряжения.

Большая часть телекоммуникационного оборудования строится по модульному принципу на основе конструктива типа «Евромеханика/Евростандарт» (рисунок 7). При таком построении системы все модули питаются от единого напряжения -48 В или -60 В [3] с последующим преобразованием до некоторого промежуточного значения (например, 12 В или 5 В), а затем — до необходимых величин. Модули, как правило, гальванически развязаны друг от друга в целях безопасности и во избежание возникновения токовых петель и взаимных помех.

В промышленных системах и системах автоматизированного управления очень часто переменное сетевое напряжение преобразуется в системное напряжение 24 В при помощи изолированных преобразователей. Требуемое количество каналов питания ПЛИС формируется от системного при помощи понижающих преобразователей (рисунок 8).

Потребительская техника и мобильная электроника питаются от аккумуляторных батарей, напряжение которых на выходе в процессе разрядки может изменяться в достаточно широком диапазоне (например — 3,6...12 В). Стабилизатор, формирующий питание ПЛИС, должен поддерживать широкий диапазон входных напряжений (рисунок 9). Требования к изоляции входа и выхода

источника в данном случае не предъявляются.

В простейшем случае в качестве вторичного источника может быть применен многоканальный импульсный преобразователь напряжения 5/12 В, формирующий все необходимые микросхеме ПЛИС напряжения питания, с подачей их в определенной последовательности и при этом — с минимальным количеством электронных компонентов снаружи, что ведет к удешевлению стоимости изделия.

Перечень требований, которые должен выполнить системный инженер при разработке проекта, достаточно широк, и для всех описанных случаев компания Maxim Integrated может предложить соответствующие решения:

- изолированные преобразователи AC/DC и DC/DC с высоким КПД и мощностью от единиц до сотен Вт;
- неизолированные импульсные преобразователи со входным напряжением 4,5...60 В;
- контроллеры первичного питания, поддерживающие ток в нагрузке до 300 А;
- вторичные импульсные многоканальные преобразователи.

Как известно, в современной электронике применяются стабилизаторы напряжения двух видов — линейные и импульсные. Линейные стабилизаторы обеспечивают ток в нагрузке от десятков мА до единиц А, но имеют недостаток — низкий КПД. Сам принцип линейного преобразования имеет диссипативный характер, а именно — напряжение на входе конвертируется в более низкое напряжение на выходе без преобразования тока, а соответственно — и мощности, «лишняя» мощность рассеивается корпусом стабилизатора. Импульсные стабилизаторы работают по принципу преобразования энергии и обеспечивают КПД до 95%, имеют низкие собственные токи утечки и позволяют получить ток в нагрузке от сотен мА до сотен А.

Возникает логичный вопрос — почему же линейные стабилизаторы не могут быть полностью заменены импульсными? Дело в том, что импульсный стабилизатор является источником помех, подавить которые до необходимого уровня в некоторых случаях не представляется возможным. Микросхемы ПЛИС, несмотря на свою цифровую природу, содержат в себе аналоговые цепи и цепи со смешанной структурой, чувствительные к качеству питания. Критичными с точки зрения помех от импульсного стабилизатора являются каналы питания встроенных в ПЛИС схем ФАПЧ (VCC_PLLA), каналы распределения тактового сигнала, высокоскоростных SerDes-преобразователей. Так, например, наличие помех в канале питания схемы ФАПЧ может привести к увели-

чению джиттера системы тактирования, помехи по питанию высокоскоростных интерфейсов ввода-вывода — к ложным срабатываниям и появлению битовых ошибок и, как результат, к дестабилизации системы цифровой обработки, построенной на ПЛИС. В случаях, когда необходимо обеспечить питание с наименьшим уровнем помех, несмотря на низкий КПД, применяются линейные стабилизаторы. В описании и руководствах по проектированию производителей микросхем ПЛИС выделяют каналы питания, критичные к наличию помех.

Помимо функции стабилизации напряжения, импульсные источники питания компании Maxim Integrated имеют такие опции, как:

- **функция секвенсора** — включение каналов питания в определенной последовательности;
- **монотонность нарастания напряжения** на выходе стабилизатора при подаче питания;
- **мягкий старт**;
- **повышенная скорость регулирования тока динамической нагрузки**. В процессе работы алгоритма цифровой обработки ток, потребляемый микросхемой ПЛИС от источника питания, может измениться в значительных пределах. Задачей стабилизатора в таких условиях является своевременная реакция на изменения тока в динамической нагрузке;
- **синхронизация от внешнего генератора**. В случае формирования нескольких каналов питания ПЛИС дискретными импульсными источниками возможно возникновение проблем электромагнитной совместимости, причиной которых является разница частоты переключения силовых элементов каждого из используемых стабилизаторов. Применение синхронизации нескольких каналов питания от одного задающего генератора позволяет частично или пол-

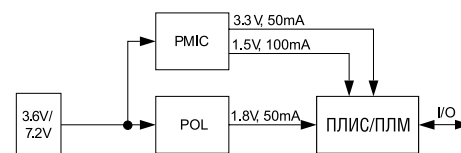


Рис. 9. Пример схемы питания ПЛИС в мобильных приложениях

ностью избежать возникновения таких ситуаций;

- **полифазная синхронизация нескольких каналов питания**. Данный прием является результатом развития идеи синхронизации от единого задающего генератора силовых элементов нескольких каналов питания. Когда переключение происходит в один момент времени, импульсные токи синфазно складываются и создают кондуктивные помехи, способные привести к дестабилизации системы на ПЛИС. Метод полифазной синхронизации подразумевает временное разделение моментов переключения силовых элементов, а соответственно — возникновение пиковых токов каждого из каналов питания на периоде регулирования. Например, при использовании трехканального импульсного преобразователя разность фаз между моментами срабатывания силовых ключей составляет 120°;
- **удаленный контроль напряжения питания на нагрузке**;
- **возможности программного управления**.

Выбор оптимального решения

Как было сказано ранее, при разработке системы питания ПЛИС необходимо выполнить следующие шаги:

- определить, каким будет напряжение питания на входе;
- определить требуемое количество каналов питания;
- определить требования по каждому каналу питания ПЛИС;

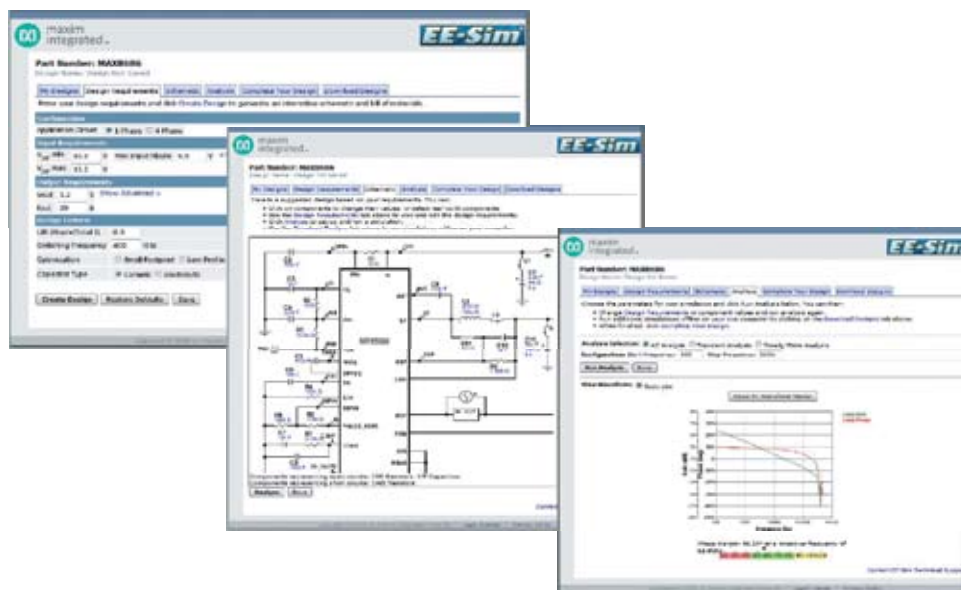


Рис. 10. Внешний вид утилиты EE-Sim

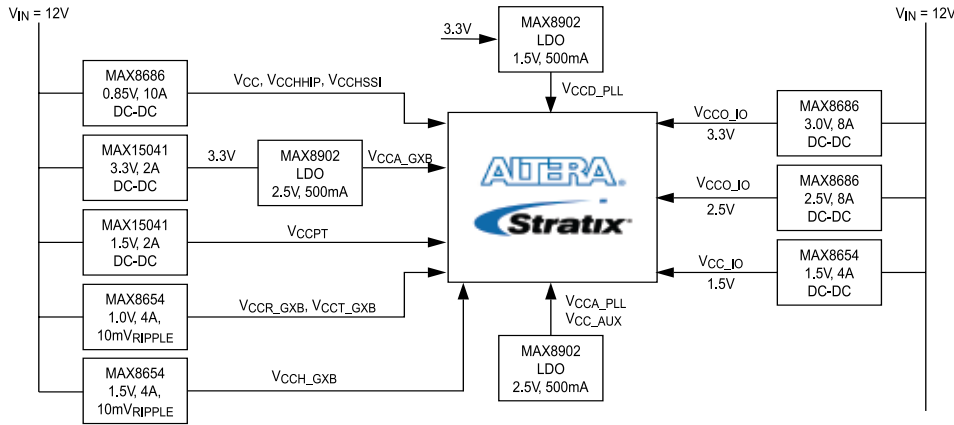


Рис. 11. Пример реализации системы питания ПЛИС Altera Stratix V [1, стр.12]

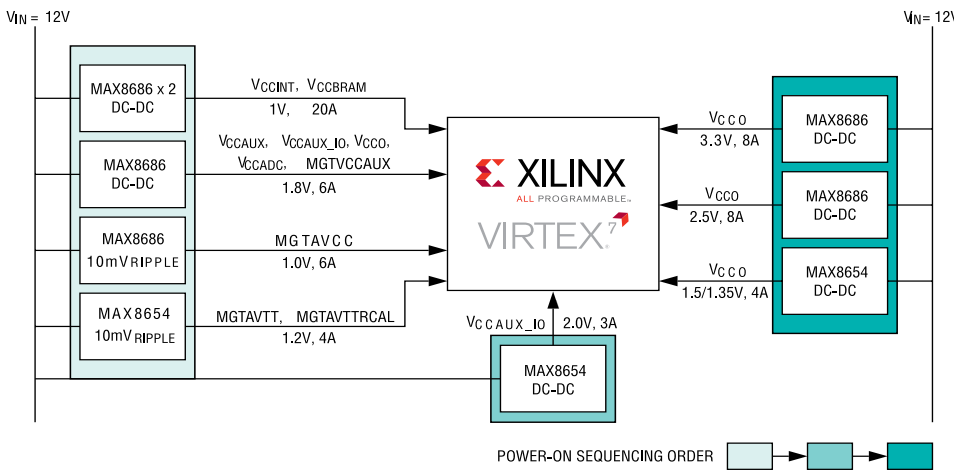


Рис. 12. Пример реализации системы питания ПЛИС Xilinx Virtex-7 [2, стр.15]

• выбрать наиболее подходящее решение по каждому из каналов питания.

С первыми двумя шагами мы уже разобрались, остается сделать прогноз по току, потребляемому микросхемой ПЛИС от источников питания. Для того, чтобы упростить выбор, компании Altera и Xilinx предоставляют инженерам утилиты для расчета потребляемой мощности в зависимости от конкретной модели ПЛИС, сложности проекта и реализованного алгоритма цифровой обработки.

Компания Altera предоставляет два инструмента для расчета потребляемой мощности – утилиту “PowerPlay Early Power Estimator”, доступную на веб-сайте компании (www.altera.com), а также встроенный в среду разработки Quartus II модуль. Первая утилита представляет собой Excel-таблицу, в которую необходимо в качестве исходных данных ввести основные параметры ядра цифровой обработки. Вторая утилита несколько более удобна, поскольку позволяет выполнять оценку токопотребления по мере готовности ядра цифровой обработки. Аналогичная утилита от Xilinx носит наименование “XPower Estimator (XPE)”.

После того, как требования сформулированы, необходимо выбрать конкретную модель источника питания для каждого канала питания ПЛИС, ру-

ководствуясь такими критериями, как размер, стоимость, эффективность, простота применения. Компания Maxim Integrated, со своей стороны, предоставляет разработчикам интерактивное руководство по выбору источников питания для ПЛИС [7].

В завершении цикла разработки схемы питания микросхемы ПЛИС, когда выбраны модели микросхем питания, разработчик может воспользоваться утилитой “Maxim Integrated EE-Sim” [8] (рисунок 10), реализованной в виде веб-приложения, которая позволяет для конкретной модели источника питания задать исходные данные, выбрать стратегию оптимизации (размер, эффективность) и рассчитать основные характеристики полученной электрической схемы. Рассмотрим в качестве примеров способ организации системы питания ПЛИС семейств Altera Stratix V и Xilinx Virtex-7 (рисунки 11, 12) от источника напряжения 12 В.

Схема питания Altera Stratix V (рисунок 11) содержит десять каналов питания, три из которых критичны к помехам от импульсных преобразователей, формируются при помощи линейных стабилизаторов – VCCA_PLL, VCCD_PLL (питание внутренних систем ФАПЧ и распределение тактового сигнала), и VCCA_GXB (аналоговое пи-

тание гигабитных приемопередатчиков). Каналы питания VCCR_GXB, VCCT_GXB, VCCN_GXB реализованы на базе импульсных преобразователей с низким уровнем пульсаций на выходе (среднеквадратическое значение 10 мВ).

Система питания ПЛИС Xilinx Virtex-7 (рисунок 12) в некоторой степени схожа с предыдущим примером, но содержит восемь каналов, два из которых реализованы при помощи импульсных стабилизаторов с низким уровнем пульсаций. Остальные каналы формируются импульсными преобразователями без особых требований по уровню пульсаций на выходе.

Подробные руководства по выбору и применению, средства разработки источников питания микросхем ПЛИС доступны на веб-сайтах компаний Altera, Maxim Integrated, Xilinx.

Заключение

На протяжении двух десятилетий компания Maxim Integrated является лидером в области производства микросхем аналоговой обработки сигнала и микросхем со смешанной структурой. Портфолио компании позволяет организовать инфраструктуру ПЛИС практически для всех случаев жизни. Это источники питания, датчики, обработка аналогового сигнала, преобразование сигналов из аналоговой области в цифровую и обратно, защита алгоритмов цифровой обработки от несанкционированного доступа, формирование и распределение тактового сигнала, и др. Стратегическое сотрудничество Maxim Integrated с такими компаниями, как Altera и Xilinx, позволяет потребителю получить комплексное решение в области аппаратно-программных комплексов на базе ПЛИС. Сеть дистрибуции и служба технической поддержки компании Maxim Integrated позволяют сократить срок разработки конечного решения и обеспечить гарантированные поставки на этапах жизненного цикла изделия.

Литература

1. PG5386. Analog Solutions for Altera FPGAs.pdf
2. Xilinx-FPGA-Product-Guide.pdf
3. ETSI ETS 300 132-2. Equipment Engineering (EE); Power supply interface at the input to telecommunications equipment; Part 2: Operated by direct current (dc)
4. www.maximintegrated.com
5. www.altera.com
6. www.xilinx.com
7. <http://www.maximintegrated.com/solutions/fpga-power/>
8. http://www.maximintegrated.com/ee_sim/

Получение технической информации, заказ образцов, поставка – e-mail: analog.vesti@compel.ru