

Радиационно-стойкая элементная база производства АО «ПКК Миландр»

Сергей ВЕДЕНИН
Данила ДЕМИДОВ
Александр МАКАРОВ
Александр ОДНОЛЬКО
Сергей ШУМИЛИН

К применяемой в космической и специальной технике элементной базе предъявляются повышенные требования по устойчивости к таким внешним факторам, как воздействие ионизирующего излучения и одиночных тяжелых заряженных частиц. Непрерывно растет и функциональная сложность микросхем, предусматривающая использование все более тонких технологических процессов их изготовления. Таким образом, с одной стороны, должны быть обеспечены требования по все более сложной функциональности микросхем, а с другой — они должны работать в более экстремальных условиях.

В настоящее время компания АО «ПКК Миландр» освоила выпуск и ведет разработку широкого ряда микросхем с технологическими нормами 180 нм КНИ с повышенной стойкостью к специальным факторам космического пространства. Данный ряд содержит микросхемы различного рода: высокопроизводительные микроконтроллеры, схемы памяти, высокоточные АЦП, источники вторичного питания, аналоговые мультиплексоры и многое другое. В статье представлен обзор новых серийных микросхем и микросхем, находящихся в разработке.

Технология

Для парирования эффектов, вызванных воздействием специальных факторов космического пространства, применяются различного рода технологические, схемотехнические и программные методы. В частности, в результате воздействия ионизирующего излучения изменяются пороговые напряжения транзисторов, для *n*-канальных порог снижается и транзистор начинает «подтекать», *p*-канальный транзистор, наоборот, «закрывается», становится медленней. Для снижения эффектов от ионизирующего излучения существуют специальные топологические приемы при разработке схем, но более действенным представляется учет влияния излучения на характеристики транзисторов.

Таким образом, если в моделях транзистора учитывается величина поглощенной дозы, то можно промоделировать, как будет вести себя микросхема при различных уровнях воздействия, и заложить в схему различные решения, способные устранить данные эффекты. Здесь, как и в обычной электронике, применяются различные схемотехнические приемы, позволяющие сделать микросхемы, устойчивые к изменению напряжения питания или температуры, модели транзисторов, учитывающие влияние накопленной дозы схемы.

При воздействии тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) в микросхемах может появиться тиристорный эффект — защелкивание тока через паразитную *p-n-p*-структуру, в результате возникает значительный ток из цепи питания в «землю», что приводит к неработоспособности микросхемы или ее отказу. Во избежание появления паразитных тиристорных структур используются различные технологические и топологические приемы. Например, применение технологий КНИ (кремний на изоляторе) позволяет разделить области *p*- и *n*-канальных транзисторов слоем диэлектрика. В этом случае обеспечивается так называемый иммунитет к тиристорному эффекту, то есть отсутствие паразитных тиристорных структур как класса. Существуют и другие методы, в частности реализация различных охранных колец вокруг транзисторов, в этом случае увеличивается уровень воздействия, при котором может возникнуть эффект. Но при любом положении необходимо внимательно следить за всей топологией схемы, а поскольку она может содержать миллионы транзисторов, сделать это в ручном режиме становится невозможным. Вот почему должны быть применены автоматизированные средства проверки схемы для выявления паразитных тиристорных структур с целью их исключения.

Данные особенности (учет накопленной дозы и автоматическое определение паразитных тиристорных структур) не включены в стандартный набор правил проектирования и моделей, поставляемых полупроводниковыми фабриками для разработчиков микросхем, а были разработаны компаний АО «ПКК Миландр» самостоятельно. Это позволяет создавать не только цифровые, но и сложные аналоговые и цифро-аналоговые радиационно-стойкие микросхемы.

Микросхемы

В настоящее время компания АО «ПКК Миландр» серийно выпускает и ведет разработку широкого ряда радиационно-стойких микросхем. Основные описания микросхем представлены в таблице 1.

Таблица 1. Радиационно-стойкие микросхемы производства АО «ПКК Миландр»

Микроконтроллеры		
1986ВЕ8Т	32-разрядный микроконтроллер с встроенной однократно программируемой памятью программ объемом 128 кбайт и широким набором аналоговой периферии и внешних интерфейсов	Серия
1986ВЕ8ТТ	Аналог микросхемы 1986ВЕ8Т, но с ОЗУ-памятью программ	В разработке
1923ВК014	32-разрядный микроконтроллер с ОЗУ-памятью программ, предназначенный для реализации систем телеметрии	Серия
Память		
1645РУ5	4-Мбит СОЗУ	Серия
1645РТ3	4-Мбит однократно программируемое ПЗУ	Серия
5576РТ1	1-Мбит однократно программируемое ПЗУ для конфигурирования ПЛИС	Серия
Аналого-цифровые преобразователи		
1923НВ015	16-разрядный сигма-дельта АЦП для систем телеметрии	Серия
1310НМ025	Двухканальный преобразователь сигналов датчиков перемещения и угол-код	Серия
Специализированные микросхемы		
1923КН014	Аналоговые мультиплексоры	Серия
1923КХ014	Цифровой коммутатор	Серия
Источники питания		
1310НН015	DC/DC-источник питания	В разработке

Микроконтроллеры 1986BE8T и 1986BE81T [1] и схемы памяти 1645PY5 1645PT3 и 5576PT1 [2], преобразователи 1310HM025 [3] уже достаточно подробно описаны в ряде публикаций, поэтому в данной статье мы остановимся на новых разработках.

Все серийно выпускаемые микросхемы обладают необходимым для космической техники уровнем стойкости. Разрабатываемые микросхемы моделируются с учетом влияния специальных факторов, и для них будут проведены квалификационные испытания с целью подтверждения требуемых уровней стойкости.

1923BK014 — микросхема контроллера памяти

Для обеспечения управления космическим аппаратом в течение всего срока активного существования требуется надежное диагностирование работоспособности и функционального состояния бортовой электронной аппаратуры. Данную функцию выполняет система телеметрического контроля, в состав которой входят сложные электронные системы, позволяющие обрабатывать большое количество телеметрических параметров, чье число может достигать нескольких тысяч. Телеметрическую информацию необходимо собрать, обработать, при необходимости запомнить и передать по служебному радиоканалу командно-измерительной системы на наземный комплекс управления, где она будет обработана и передана для анализа и принятия решений. Для решения задач телеметрии создана серия микросхем 1923. Структурная схема системы телеметрического контроля представлена на рис. 1.

Микросхема 1923BK014 предназначена для сбора, обработки, сохранения полученной информации в памяти и последующей передачи полученных данных на центральный вычислитель космического аппарата или наземные центры. Для решения данных задач микросхема содержит 32-разрядное процессорное ядро, специализированные контроллеры внешней

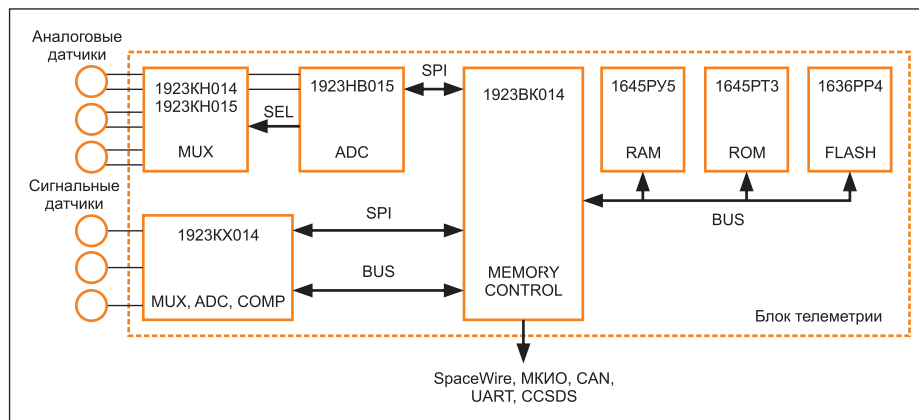


Рис. 1. Структурная схема системы телеметрического контроля на базе серии микросхем 1923

памяти и набор различных периферийных интерфейсов. Основные характеристики микросхемы представлены в таблице 2.

Микросхема не содержит энергонезависимой памяти программ, таким образом, при включении питания микросхема должна быть сконфигурирована из внешнего источника. Основные режимы запуска микросхемы представлены в таблице 3.

Важным элементом микросхемы является контроллер внешней памяти. Он позволяет осуществить хранение различной информации во внешних микросхемах памяти. При этом аппаратно выполняется помехозащищенное кодирование и могут быть выбраны следующие режимы:

- Режим ECC8 для 32-битного слова позволяет:
 - обнаруживать и исправлять произвольные одиночные ошибки;
 - обнаруживать любые двойные ошибки.
 - Режим ECC16 для 32-битного слова позволяет:
 - обнаруживать и исправлять произвольные одиночные и двойные ошибки;
 - обнаруживать любые тройные ошибки.
- Хранение проверочных битов ECC может быть осуществлено в параллельном режиме

PECC за счет расширения разрядности шины данных на 8 или 16 дополнительных бит. Также проверочные биты могут быть сохранены в последовательном виде SECC, когда биты сохраняются в той же памяти, но в более старших адресах. При последовательной организации хранения ECC-битов физическая разрядность шины данных может быть 8-, 16- или 32-битной. Это позволяет строить системы, различные по своей сложности и габаритам.

Другой принципиально новый элемент данной микросхемы — контроллер ведущего процессора CPUIF. Фактически это контроллер внешней шины, но для обработки запросов от другого процессора, например 1986BE8T. Данный интерфейс позволяет использовать микросхему 1923BK014 как периферийный контроллер для увеличения числа интерфейсов или как мост для организации внешнего накопителя с расширенными функциями помехозащищенного кодирования. Работа с интерфейсом CPUIF организована через последовательное расширение функционала. То есть при включении питания блок позволяет работать с ним в 8-битном режиме (игнорируя старшие биты данных и адресов). Таким образом можно начать работать даже с 8-битными микроконтроллерами. После начала работы,

Таблица 2. Характеристики микросхемы контроллера памяти 1923BK014

Параметр	1923BK014
Процессорное ядро	RISC 32
Тактовая частота ядра, МГц	50
ОЗУ памяти программ, кбайт	32 + ECC
ОЗУ памяти данных, кбайт	32 + ECC
Напряжение питания, В	3–5,5
Внешняя шина, бит	8, 16, 32 + ECC
Контроллер ведущего процессора	Есть
Контроллер МКПД	4
Контроллер SPI	6
Контроллер UART	2
Контроллер CAN	2
Контроллер SpaceWire + PHY	2
Контроллер CCSDS	1
Схема 32-разрядного таймера	4
Часы реального времени	1
Блок расчета CRC/ECC	1
Рабочая температура, °С	–60...+125
Корпус	4245.240-6.01

Таблица 3. Режимы запуска микросхемы 1923BK014

Биты ECC MODE[7:4]	Биты режима MODE[3:0]	Режим	Краткое описание
0000	0000	WAIT_BOOT_JA	Ожидание в бесконечном цикле с включенным интерфейсом отладки через выводы JTAG_A
0111	0001	–	Резерв
1011	0010	–	Резерв
1100	0011	EXTBUS_8_ECC+JB	Запуск из внешней памяти, сконфигурированной в минимальный режим с последовательной организацией ECC с JTAG_B
1101	0100	EXTBUS_8_ECC+JA	Запуск из внешней памяти, сконфигурированной в минимальный режим с последовательной организацией ECC с JTAG_A
1010	0101	EXTBUS_CFG+JB	Запуск из внешней памяти с чтением конфигурации в режиме с JTAG_B
0110	0110	EXTBUS_CFG+JA	Запуск из внешней памяти с (0x1000_0000) с чтением конфигурации в режиме с JTAG_A
0001	0111	SPI0+JB	Загрузка последовательно из внешней памяти по SPI0-интерфейсу с JTAG_B
1110	1000	SPI1+JA	Загрузка последовательно из внешней памяти по SPI0-интерфейсу с JTAG_A
1001	1001	SPI2+JB	Загрузка последовательно из внешней памяти по SPI0-интерфейсу с JTAG_B
0101	1010	SPI3+JA	Загрузка последовательно из внешней памяти по SPI0-интерфейсу с JTAG_A
0010	1011	UART0+JB	Загрузка последовательно из внешней памяти по UART0-интерфейсу с JTAG_B
0011	1100	UART0+JA	Загрузка последовательно из внешней памяти по UART0-интерфейсу с JTAG_A
0100	1101	–	Резерв
1000	1110	–	Резерв
1111	1111	TEST_MODE+JB	Тестовый режим микросхемы для отбраковочного тестирования с включенным интерфейсом отладки через выводы JTAG_B
–	Двойная ошибка	WAIT_BOOT_JB	Ожидание в бесконечном цикле с включенным интерфейсом отладки через выводы JTAG_B

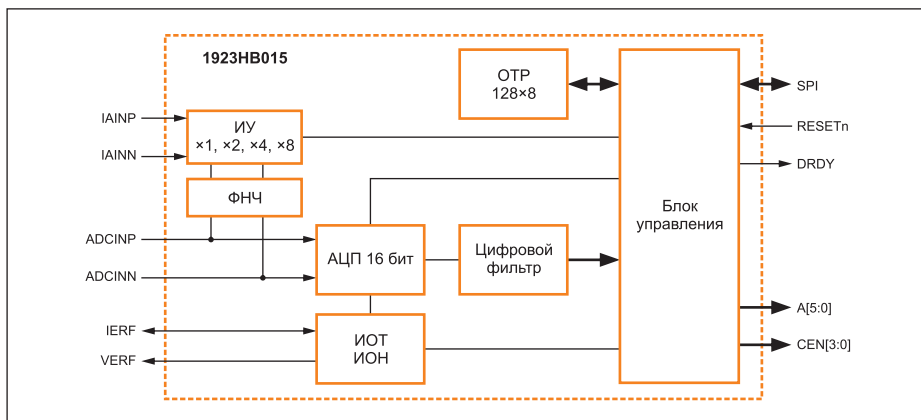


Рис. 2. Структурная схема микросхемы АЦП 1923NB015

Таблица 4. Характеристики микросхемы АЦП 1923NB015

Параметр	1923NB015
Разрядность АЦП, бит	16
Время преобразования, мс	Не более 2
Тип входного сигнала	Дифференциальный
Инструментальный усилитель	$\times 1, \times 2, \times 4, \times 8$
Напряжение питания, В	3–5,5
Соотношение сигнал/шум + искажение АЦП, дБ	Не менее 76
Источник опорного тока, мА	2,78
Источник опорного напряжения, А	2,5
Смещение АЦП, LSB	-45...+45
Смещение АЦП + ИУ, мВ	-22...+22
Ошибка усиления АЦП, %	-1...+1
Калибровка ошибки смещения и усиления	Есть
Интерфейс	SPI
Встроенная память ОТА	128x8 (+ECC)
Рабочая температура, °С	-60...+125
Корпус	МК 5142.48-А

записывая новые настройки в блок CPUIF, можно увеличивать как разрядность данных, так и адресный диапазон, а следовательно, и производительность всей системы. Через блок CPUIF осуществляется доступ к внутренней памяти микросхемы 1923, к периферийным блокам, включая контроллер внешней шины. При этом работа встроенного процессорного ядра микросхемы 1923BK014 не блокируется, но имеет меньший приоритет по отношению к CPUIF.

1923NB015 — микросхема 16-разрядного дифференциального АЦП

В системах телеметрии различаются следующие типы датчиков.

- Сигнальные (цифровые датчики):
 - запитанный электронный ключ с уровнем логического нуля 0–1 В и уровнем логической единицы от 2 В;
 - незапитанный электронный ключ, характеризующийся падением напряжения при логическом нуле 0–1 В и падением напряжения при логической единице более 2 В;
 - «сухой» контакт с сопротивлением логического нуля до 3 кОм и логической единицы более 100 кОм.

- Аналоговые датчики:
 - генераторные датчики вольтового диапазона с U_{OUT} 0–6,3 В;
 - генераторные датчики милливольтного диапазона с U_{OUT} 0–400 мВ;
 - аналоговые параметрические датчики (терморезисторы) с U_{OUT} 0–40 мВ;
 - аналоговые тензометрические датчики с U_{OUT} 0–40 мВ.

Для обработки сигналов с аналоговых датчиков используется АЦП 1923NB015. Основные характеристики микросхемы представлены в таблице 4.

Структурная схема микросхемы представлена на рис. 2.

Управление микросхемой и передача данных с АЦП осуществляется через SPI-интер-

фейс. Для управления аналоговыми мультиплексорами (1923KH014 и 1923KH015) в микросхеме реализованы выходы A[5:0] и CEN[3:0]. Для обработки сигналов с температурных датчиков в микросхеме предусмотрен инструментальный усилитель с переменным ($\times 1, \times 2, \times 4$ и $\times 8$ раз) коэффициентом усиления и сглаживающий ФНЧ с частотой среза не более 20 кГц. В составе микросхемы предусмотрен источник опорного тока 2,78 мА для задания тока датчиков, а также однократно программируемая память объемом 128x8 бит, в которой находятся калибровочные коэффициенты и может быть сохранена другая пользовательская информация.

1923KH014 и 1923KH015 — микросхемы аналогового мультиплексора

Для переключения между различными датчиками либо иной коммутации аналоговых сигналов используются микросхемы 1923KH014 и 1923KH015. Их основные характеристики представлены в таблице 5.

Аналоговый мультиплексор может работать в двух режимах:

- дифференциальный мультиплексор CONFIG = 0;
- мультиплексор одиночного сигнала CONFIG = 1.

Управление коммутацией осуществляется через порт А. При этом для создания сложных коммутационных систем, например, когда необходимо осуществить коммутацию

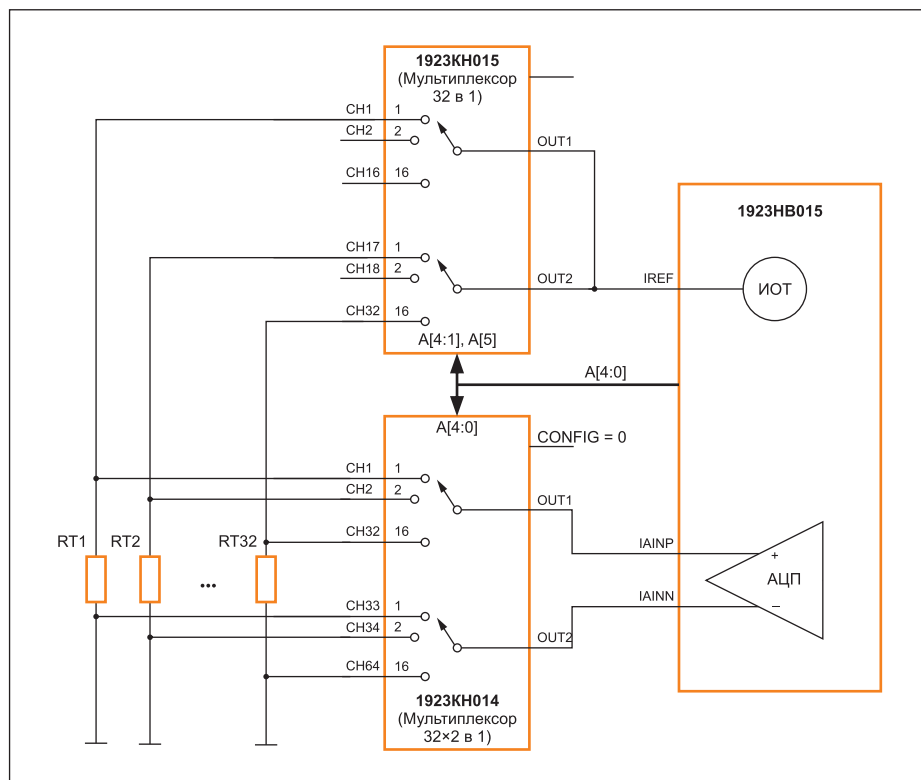


Рис. 3. Структурная схема реализации подключения терморезисторов с помощью микросхем аналоговых мультиплексоров 1923KH014 и 1923KH015

Таблица 5. Характеристики микросхем 1923КН014 и 1923КН015

Параметр	1923КН015	1923КН014
Мультиплексор	2× (16 в 1) 32 в 1	2× (32 в 1) 64 в 1
Напряжение питания, В		3–5,5
Напряжение питания аналоговых ключей U_{EE+} и U_{EE-} , В	-16,5...-7 7–16,5	
Типовое сопротивление ключей, Ом		400
Время включения ключа, нс		400
Время выключения ключа, нс		200
Напряжение защиты аналоговых ключей, В		±23
Режим холодного резерва	Есть, ключи разомкнуты	
Рабочая температура, °С	-60...+125	
Уровни управляющих сигналов	КМОП и ТТЛ	
Коммутируемое напряжение, В	$U_{EE-}+3$... $U_{EE+}-3$	
Коммутируемые токи, мА		-3...3
Корпус	МК 5133.48-4	МК 4247.100-1

как самих датчиков, так и опорных токов на датчики, реализованные механизмы позволяют осуществить управление от одного сигнала выбора датчика. Типовая схема коммутации набора терморезисторов представлена на рис. 3.

Также в данной микросхеме реализованы различные вспомогательные функции, например создание мертвой зоны при переключении ключей, это позволяет исключить влияние одного сигнала на другой. Микросхема может использоваться в холодном резерве, когда при отсутствии питания все ключи гарантированно разомкнуты.

1923КХ014 — микросхема цифрового коммутатора

Для обработки сигнальных цифровых датчиков или аналоговых датчиков вольтового диапазона применяется микросхема цифрового коммутатора 1923КХ014. Основные характеристики микросхемы представлены в таблице 6.

Структурная схема микросхемы представлена на рис. 4.

Общее число входных сигналов составляет 64. Микросхема содержит восемь встроенных аналоговых компараторов с 25 программируемыми уровнями сравнения 0–2,5 В. Каждый компаратор может выбрать один из восьми входных сигналов. Входной кас-

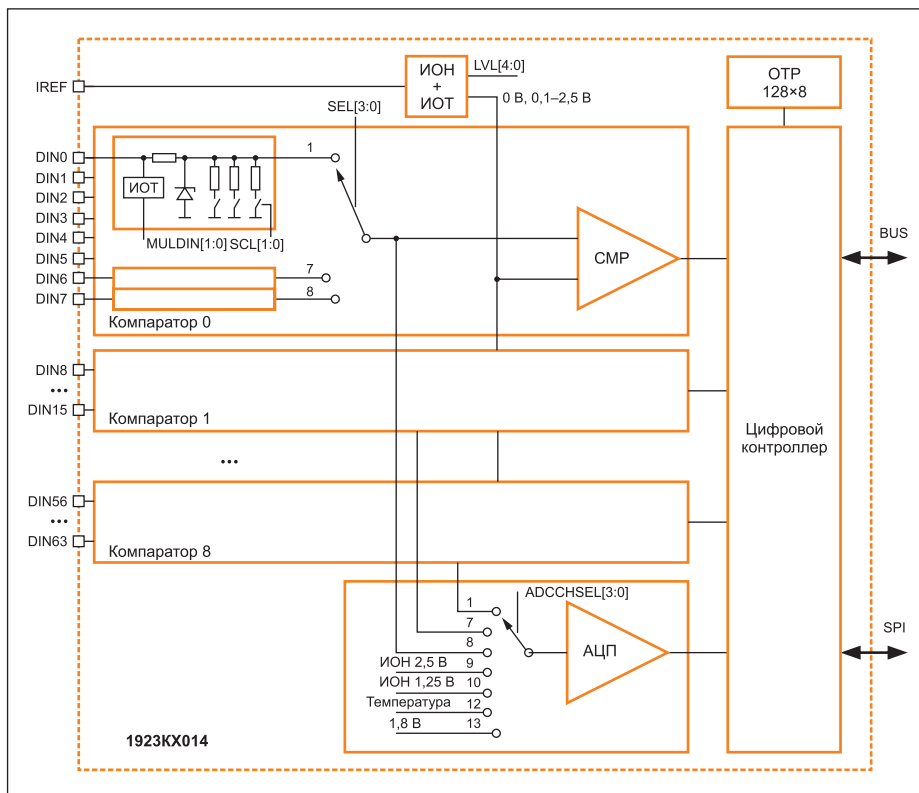


Рис. 4. Структурная схема микросхемы 1923КХ014

кад до мультиплексора содержит управляемый источник опорного тока, который задает как втекающий, так и вытекающий ток со значением 2,78 и 0,375 мА. Кроме того, реализована схема защиты с ограничением входного сигнала на уровне 5 В и схема резистивного делителя, позволяющего поделить уровень входного сигнала в 2, 3 или 4 раза. При этом если после деления входной сигнал окажется ниже уровня защиты, то защита отключается, что позволяет анализировать сигналы с уровнями до 7,5 В. Значения на выходе компараторов могут быть считаны как напрямую через параллельную шину, так и через последовательный SPI-интерфейс. Кроме того, все восемь выбранных для компараторов каналов входных сигналов могут быть заведены на блок 12-битного АЦП для определения более точного значения уровня

сигнала. Также на АЦП могут быть обработаны различные внутренние сигналы микросхемы — источники опорных напряжений, напряжений питания и значения со встроенного термодиода. АЦП может работать в различных режимах, например в режиме с усреднением, когда для определения значения сигнала выполняется 10 преобразований, из полученных результатов отображаются минимальный и максимальный, а для остальных восьми определяется среднее арифметическое значение.

1310НН015 — микросхема DC/DC-источника питания

Для обеспечения напряжений питания разрабатываются микросхемы для создания источников вторичного питания. Микросхема

Таблица 6. Характеристики микросхемы 1923КХ014

Параметр	1923КХ014
Аналоговые компараторы, шт.	8
Разрядность/скорость АЦП	12 бит при 2 мс
Источник опорного тока, мА	±2,78 и ±0,35
Напряжение питания, В	3–5,5
Дифференциальная нелинейность АЦП, ЕМР	-1...+2
Интегральная нелинейность АЦП, ЕМР	-3...+3
Смещение АЦП, ЕМР	-15...+15
Режим усреднения результатов	Есть
Напряжение на входе DIN, В	До 7,5
Источник опорного напряжения, В	2,5
Интерфейс	SPI и/или параллельная шина
Встроенная память ОТФ	128×8 (+ЕСС)
Корпус	4229.132-3

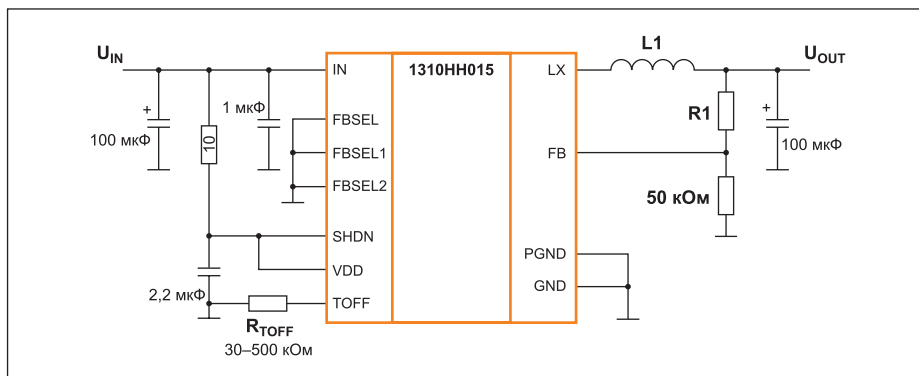


Рис. 5. Типовая схема включения микросхемы 1310НН015

Таблица 7. Характеристики микросхемы DC/DC-источника питания 1310НН015

Параметр	1310НН015
Входное напряжение, В	3–5,5
Ток нагрузки, А	До 2
Выходное напряжение, В	Фиксированный ряд 3,3; 2,5; 1,8; 1,2 и 1 или настраиваемое
Точность выходного напряжения, %	3
Ток потребления холостого хода, мкА	400
Частота коммутации	100 кГц – 1 МГц
Встроенная защита от КЗ	Есть
Режим мягкого запуска	Есть
Рабочий температурный диапазон, °С	–60...+85
Корпус	5147.24-1

1310НН015 представляет собой законченный DC/DC со встроенными силовыми ключами. Основные характеристики представлены в таблице 7.

Типовая схема включения микросхемы показана на рис. 5.

В представленной схеме значение выходного напряжения определяется соотношением резистивного делителя в цепи обратной связи FB:

$$U_{OUT} = (R1/50 \text{ кОм} + 1) \times U_{REF}$$

Таблица 8. Значения параметров элементов окружения микросхемы 1310НН015 для различных режимов работы

U _{IN} , В	U _{OUT} , В	I _{OUT}	L1, мкГн	R _{TOFF} , кОм
5	3,3	2	4,7	68
5	2,5	2	5,1	100
5	1,8	2	4,7	128
5	1,2	2	3,9	152
3,3	2,5	2	2,7	48
3,3	1,8	2	3,3	91
3,3	1,2	2	3	127
5	3,3	1	9,1	68
5	2,5	1	10	100
5	1,8	1	10	128
5	1,2	1	7,5	152
3,3	2,5	1	5,1	48
3,3	1,8	1	6,8	91
3,3	1,2	1	6,2	127

где U_{REF} — внутреннее опорное напряжение, равное 1 В.

Также в зависимости от режимов использования схемы должна быть определена индуктивность L1 и R_{TOFF}, способ расчета приведен в спецификации микросхемы, ориентировочные значения для различных режимов представлены в таблице 8.

Заключение

Разработанные и разрабатываемые микросхемы обеспечивают весь комплект элементной базы, необходимой для создания радиоэлектронной аппаратуры с высокими уровнями стойкости. Развитие линейки направлено в область более высоковольтных решений, например микросхемы DC/DC-регуляторов с уровнем входного питания 12 и 27 В. Также проекты в виде готовых IP-блоков, таких как АЦП, ЦАП и схемы приемопередатчиков, позволяют создавать различные решения под требования заказчиков. ■

Литература

1. Лопарев М., Шумилин С. Отладка программного обеспечения в микроконтроллерах 1986ВЕ8 и 1986ВЕ81 // Компоненты и технологии. 2017. № 7.
2. Шумилин С. Радиационно-стойкие микросхемы от компании «Миландр» // Компоненты и технологии. 2015. № 7.
3. Лужбинин А., Хамизов Р., Ануфриев В. 16-рядный преобразователь сигналов датчиков перемещения // Электронные компоненты. 2017. № 4.