

Интеллектуальные датчики в информационно-управляющих системах: развитие, элементная база и ПО

Владимир АНУФРИЕВ
anufriev.vladimir@ic-design.ru

Станислав АФАНАСЬЕВ

Статья посвящена истории развития интеллектуальных датчиков для информационно-управляющих систем и подробному обзору микросхем, микроконтроллеров и программного обеспечения, необходимых для функционирования таких приборов.

История вопроса

Место датчиков в сложных подвижных объектах

Параллельно развитию IoT («Интернет вещей») и Real-Time Ethernet в промышленности происходит и эволюция в замкнутых сложных системах управления подвижными объектами. В настоящий момент во всемирной сети Интернет количество подключенных приборов превысило население Земли в 1,5–2 раза и продолжает стремительно расти. В подвижных объектах происходит то же самое: число обслуживаемых датчиков и исполнительных механизмов, информационно доступных центральной вычислительной системе управления, непрерывно увеличивается. Если 30–35 лет назад в серийных автомобилях, кроме контроля скорости, температуры двигателя и еще трех-шести параметров, никакой контрольно-измерительной аппаратуры не было, то сегодня даже в самом простом автомобиле можно насчитать более десятка микроконтроллеров, осуществляющих контроль до сотни различных параметров автомобиля.

Основные типы измеряемых величин в управляющих системах

В информационно-управляющих системах сложных подвижных объектов, таких как самолеты, вертолеты, сложная наземная тяжелая техника, автокраны, трубоукладчики и т. п., сейчас используются конструктивно и функционально законченные датчики измерения всевозможных физических величин с различными цифровыми интерфейсами.

К ним относятся датчики линейных и угловых перемещений, в том числе и БВК (бесконтактные концевые выключатели) на индуктивном, емкостном, магнитном и ультразвуковом принципах измерения, датчики усилий, давления и механического напряжения, тоже основанные на различных физических принципах, расходомеры жидкостей и газов, уровнемеры и датчики измерения объемов, угловых и линейных ускорений, инклинометры, датчики химических веществ, в частности селективные.

Предпосылки развития датчиков систем управления

По мере развития микроэлектроники, например элементной базы для обработки сигналов датчиков, и усложнения систем управления объектами все большее развитие получают удаленные интеллектуальные приборы и исполнительные механизмы. С целью унификации многообразия датчиков и снижения стоимости комплектации и регулировки систем управления объектами повышенной сложности к датчикам предъявляются требования по нормализации и линеаризации выходного сигнала, а также по унификации интерфейсов в части метода кодирования и протокола передачи данных.

В результате унификации требований и особенностей эксплуатации систем управления подвижными объектами появилась возможность и необходимость разработки и изготовления специальной элементной базы для комплектации удаленных интеллектуальных датчиков и исполнительных механизмов.

Возникла потребность в формировании элементной базы, которая могла бы позволить создавать «умные» периферийные устройства — всевозможные датчики физических величин со встроенной цифровой коррекцией и нормализацией выходного сигнала под стандартные интерфейсы, интеллектуальные силовые ключи с элементами защиты и самотестирования, интеллектуальные приводы на основе электронно-механических приводов и другие периферийные интеллектуальные исполнительные устройства. Словом, для сокращения количества кабельного хозяйства объектов происходит децентрализация систем управления, приводящая к повышению надежности и уменьшению массогабаритных показателей систем управления объектами.

Общие требования к элементной базе подвижных объектов

Главное отличие элементной базы подвижных объектов — качество.

В статье [2] приведена таблица 1 основных показателей (требований) к электронике для различных областей применения.

Из таблицы 1 видно, что самые высокие требования предъявляются к автомобильной электронике. Аналогичные требования распространяются и на иные подвижные объекты, что в первую очередь связано с безопасностью движения, поскольку в отличие от объектов промышленности они связаны с присутствием людей, иногда в большом количестве, как, например, в общественном транспорте. Однако габариты и условия эксплуатации часто не позволяют создавать резервированные системы в полном объеме, а также системы устранения последствий аварий, скажем системы пожаротушения и подобные автономные системы.

Поэтому по своей архитектуре системы управления подвижными объектами в первую очередь направлены на предотвращение аварий

Таблица 1. Стандартные условия работы для различных электронных систем

Показатель	Потребительская электроника	Промышленная электроника	Автомобильная электроника
Температура, °C	0...+40	–10...+70	–40...+160
Срок службы, лет	2–5	5–10	До 15
Влажность	Низкая	Окружающей среды	От 0 до 100%
Срок снабжения (запчастями), лет	В среднем 1	2–5	До 30
Допустимая интенсивность отказов, %	<10	<<1	Цель: 0

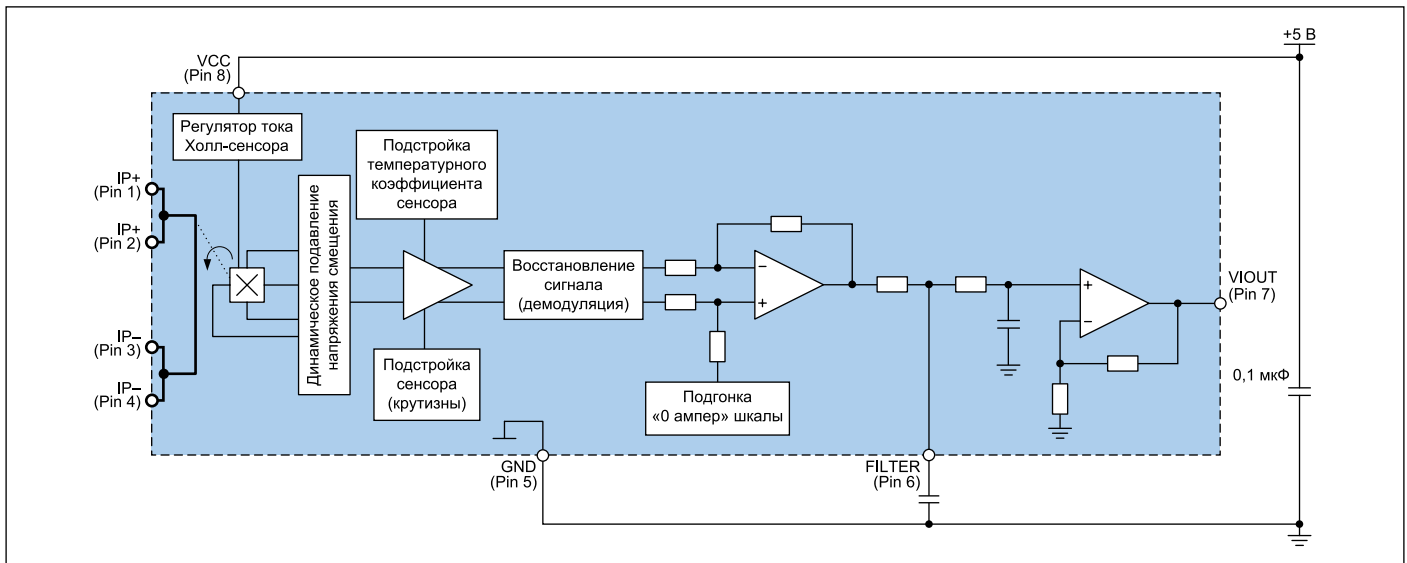


Рис. 1. Структурная схема микросхемы ACS713

и во вторую — на уменьшение их последствий. Создание таких систем требует постоянно увеличивающегося количества всевозможных датчиков, например автономных датчиков давления в шинах автомобиля, с развитой системой самодиагностики и диагностики при техническом обслуживании специалистами невысокой квалификации, с возможностью обслуживания в полевых условиях.

Развитие микросхем для датчиков

В современных системах сбора и обработки информации число различных автономных датчиков, поставляющих телеметрическую информацию о текущем состоянии объектов управления, неуклонно повышается. Непрерывно увеличивается их точность и быстродействие. Более интенсивными становятся потоки информации, поступающие от датчиков в вышестоящие системы управления. По мере роста производительности микроконтроллеров и снижения их стоимости появляются замкнутые локальные системы управления отдельными модулями технологических систем. Возникают роботизированные устройства, которые могут действовать автономно или под управлением глобальных команд из внешней системы управления.

Развитие подобных систем невозможно без совершенствования интеллектуальных датчиков, способных легко включаться в системы сбора данных. Другими словами, современные датчики должны обладать развитыми интерфейсами и нормированными (стандартизированными) форматами передачи данных.

Кроме того, с проникновением микропроцессорных систем управления во все менее габаритные объекты управления требования по массогабаритным характеристикам и надежности к этим приборам постоянно возрастают.

Стремительно стали развиваться датчики на основе микромеханических систем (МЭМС). В качестве примера таких датчиков можно назвать 6- и даже 9-осевые МЭМС-датчики положения, измеряющие угловые и линейные ускорения и магнитное поле по трем координатам. Есть и аналогичные по габаритам и точности МЭМС-датчики иных физических величин.

В то же время существует и непрерывно растет потребность в датчиках физических величин, обладающих повышенной точностью измерения по сравнению с МЭМС, или отличающихся повышенной стойкостью к ВВФ, или измеряющих физические величины, пока недоступные для МЭМС.

Для реализации таких датчиков с выполнением современных требований к изделиям подобного рода необходима и современная элементная база.

Развитие микросхем для датчиковой тематики прошло три стадии:

1. Простые аналоговые микросхемы с однократной калибровкой параметров. Большинство микросхем массового производства выпускаются по такой архитектуре. К ним можно отнести всевозможные измерители на основе элементов Холла (датчики тока и положений).
2. Микросхемы со встроенными конечными автоматами, реализующие корректирующие полиномы. К ним относятся микросхемы, предназначенные для обработки сигналов датчиков на основе мостовых резистивных чувствительных элементов. Как правило, такие микросхемы используются для коррекции микросхем с отклонением от линейности не более $\pm 5\%$, или они имеют большой массив ПЗУ для организации кусочно-линейной аппроксимации с количеством участков аппроксимации 100 и более.
3. Микросхемы со встроенными микроконтроллерами. Зачастую на основе этих микросхем можно построить конструктивно и функционально законченный датчик со встроенными интерфейсами.

Примеры структур микросхем для обработки сигналов датчиков

Простые аналоговые микросхемы с однократной калибровкой ACS713

Микросхема представляет собой датчик тока со встроенным измерительным проводником. Величина измеряемого тока — до 30 А. Структурная схема микросхемы показана на рис. 1.

Так как не указана методика калибровки, а на схеме изображены узлы температурной компенсации, регулирования крутизны и смеще-

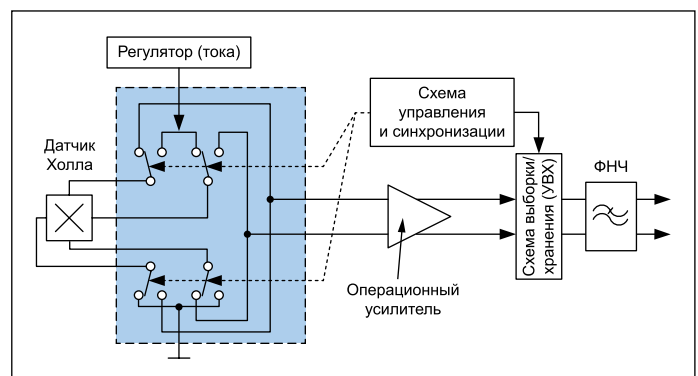


Рис. 2. Принцип обработки сигнала магнитного датчика в микросхеме ACS713

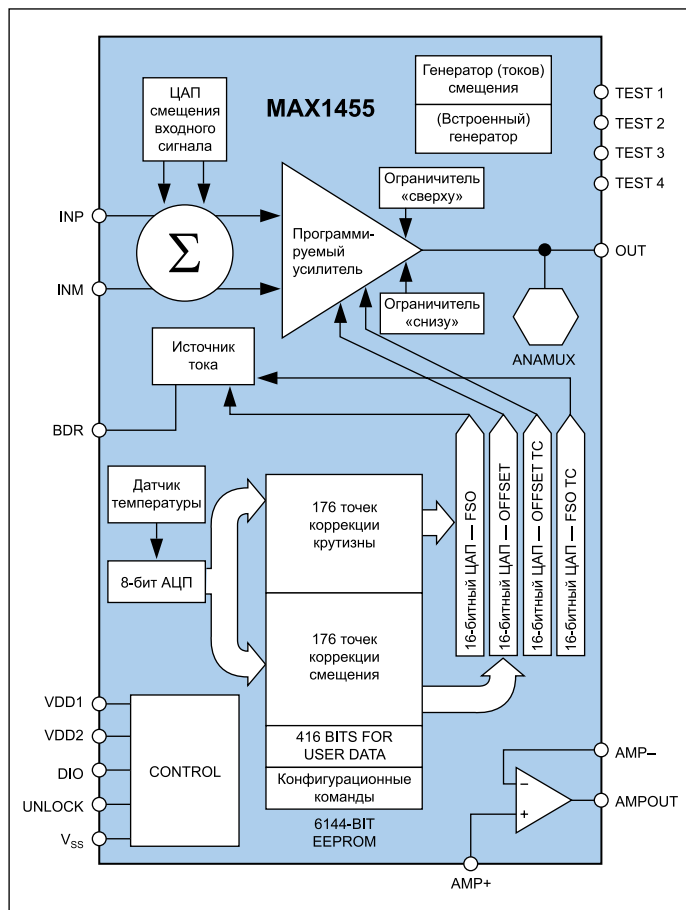


Рис. 3. Структурная схема микросхемы MAX1455

ние «0», то можно предположить, что калибровка выполняется однократно с помощью лазерной подгонки.

Особенностью микросхемы является узел Chopper Stabilization, позволяющий компенсировать технологические и температурные погрешности элемента Холла (рис. 2).

Микросхемы со встроенными цифровыми автоматами MAX1455

Микросхема (рис. 3) предназначена для обработки сигналов резистивных датчиков и обеспечивает усиление сигнала датчика, его нормализацию и температурную компенсацию. Содержит прямой аналоговый канал от входа до выхода с цифровой коррекцией коэффициента усиления и напряжения смещения, а также смещения сигнала датчика в середину линейной зоны передаточной характеристики микросхемы. Также микросхема имеет программируемый генератор тока питания датчика, датчик температуры с 8-разрядным АЦП и 16-разрядный цифровой автомат коррекции сигнала микросхемы с 6144-бит EEPROM.

Температурная коррекция осуществляется в диапазоне $-40...+125^{\circ}\text{C}$.

Программирование выполняется по оригинальному однопроводному интерфейсу, поставляемому совместно с микросхемой. Библиотека программного обеспечения, кроме поддержки вычисления поправочных коэффициентов, включает типовые характеристики более чем на 2000 первичных датчиков от разных производителей. Такая поддержка способствует расширению области применения микросхемы.

Недостатком микросхемы является необходимость снятия не менее 176 точек по температуре и отсутствие коррекции нелинейности характеристики первичного датчика, таким образом, микросхема эффективно может использоваться только с высоколинейными датчиками, например тензорезистивными кремниевыми датчиками давления.

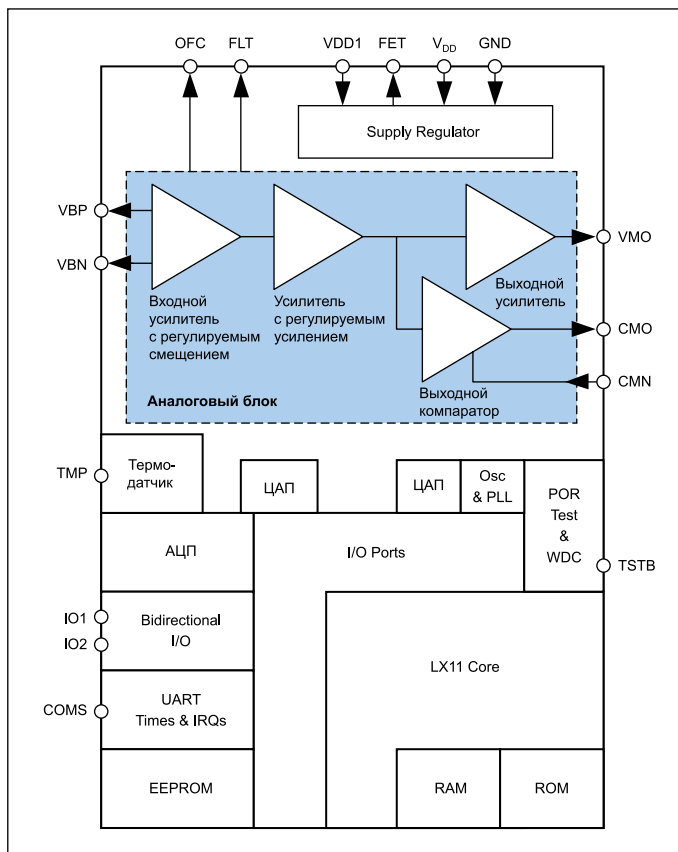


Рис. 4. Структурная схема микросхемы MLX90308CAB

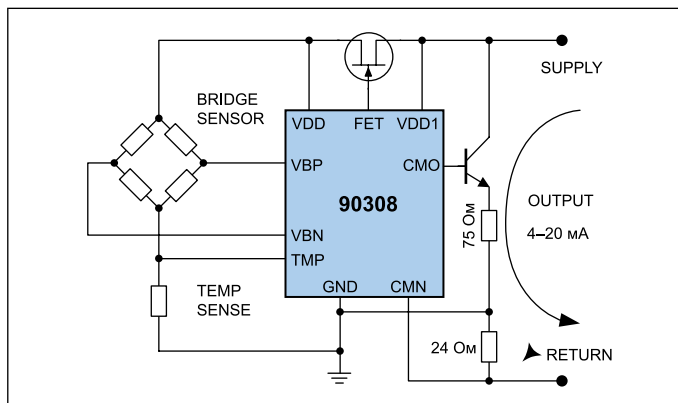


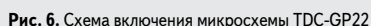
Рис. 5. Пример включения микросхемы MLX90308CAB в качестве датчика с выходом 4–20 мА

MLX90308

Оригинальная микросхема, позволяющая на ее основе выполнить датчик с токовым выходом 4–20 мА. Структурная схема показана на рис. 4. Архитектура микросхемы напоминает структуру MAX1455 с тем отличием, что вместо цифрового автомата используется 8-разрядный микроконтроллер семейства LX11. Данная архитектура способна более гибко использовать имеющиеся в микросхеме аналоговые узлы. Помимо организации сквозного аналогового канала с цифровой коррекцией, микросхема обладает широкими возможностями по организации выдачи сигнала датчика. В том числе и получить токовый выход, как это показано на рис. 5.

Микросхемы на основе время-цифровых преобразователей

Микросхемы на основе время-цифровых преобразователей (TDC) нашли свое место в системах точного учета каких-либо физиче-



На ее основе совместно с микросхемой микропроцессора со встроенным радиоканалом можно выполнить автономный датчик с длительным сроком работы.

Из перечисленного списка видно, что в ходу 8-, 16- и 32-разрядные ядра. Но по мере уменьшения проектных норм и, как следствие, сокращения площади цифровых узлов наметилась устойчивая тенденция в сторону 32-разрядных ядер, в первую очередь ARM-Cortex Mxx. Благодаря эффективной системе команд Thumb2 данное семейство позволяет использовать небольшой объем памяти команд, поэто-

Рис. 7. Структурная схема микросхемы MAX35101

му оно получило широкое распространение и используется в качестве встраиваемого вычислительного ядра более чем сотней фирм, занятых разработкой универсальной и специализированной элементной базы. Также эффективность микросхем повышается благодаря применению функционально законченных реконфигурируемых цифровых конечных автоматов, в частности контроллеров последовательных интерфейсов.

Приведем в качестве примера архитектуры микросхем семейств ADuC и MSP430.

ADuC7060

Микросхема (рис. 8) с двумя встроенными каналами DS-ADC и одним каналом DAC выполнена на основе ядра ARM7TDMI (занимает площадь менее 0,5 мм²) и оснащена несколькими последовательными портами. В активном режиме на частоте 10 МГц потребляет не более 10 мА.

Кроме DS-ADC, архитектура каких-либо особенностей не имеет. Размер корпуса в исполнении LFCSP не более 5×5 мм, что позволяет легко интегрировать данную микросхему в конструкцию различных датчиков.

MSP430F1222

Семейство микросхем MSP430 настолько велико и разнообразно по составу периферийного оборудования, что для их представления необходима отдельная статья, а лучше брошюра.

Микросхемы данного семейства содержат в своем составе даже USB2-контроллеры и радиоканалы. Поэтому приводим одну из самых малогабаритных микросхем данного семейства — MSP430F1222. Размер корпуса не превышает 5×5 мм. Структура показана на рис. 9.

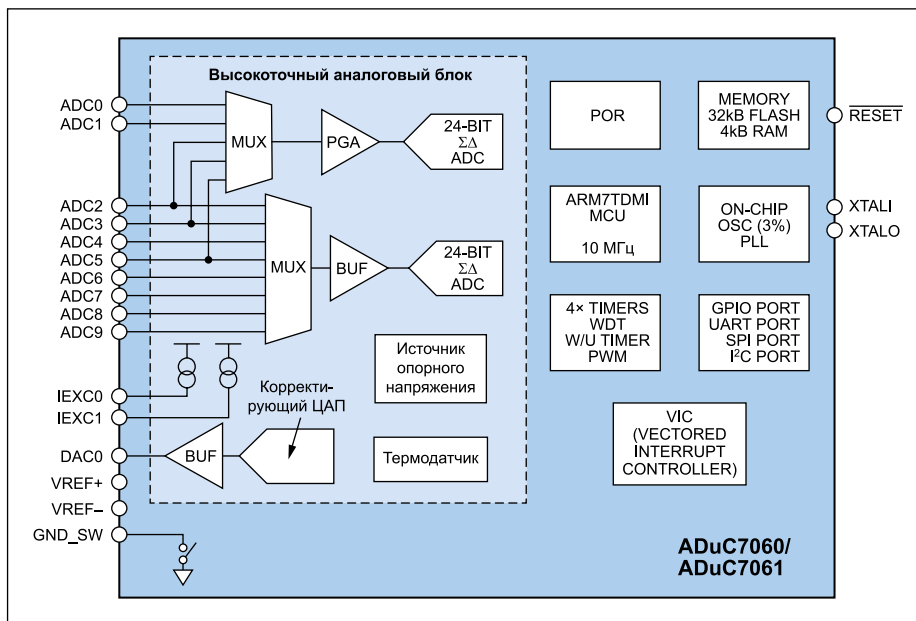


Рис. 8. Структурная схема микроконтроллера ADuC7060

Анализ зарубежного рынка микросхем для датчиков

С учетом большого объема номенклатуры микросхем и темы настоящей статьи, анализ микросхем для датчиков проведен в части микроконтроллеров, оптимизированных для устройств первичной обработки информации.

На рынке периферийных микроконтроллеров ведущими фирмами более чем с 80% долей присутствуют компании Microchip, Atmel, Analog Devices, Texas Instruments, Acam, Silicon Labs.

Microchip

Для разработки датчиковой аппаратуры Microchip выпускает семейство dsPIC30F (4 типонаминала) в развитие серий dsPIC33 (54 типонаминала), PIC24H, PIC24F (66 типонаминалов). Все они построены на 16-разрядном ядре, из них более половины выпускается в корпусах на 44 вывода и размером менее 10×10 мм.

Atmel

Для разработки датчиковой аппаратуры Atmel предлагает обширную номенклатуру 8- и 32-разрядных микроконтроллеров се-

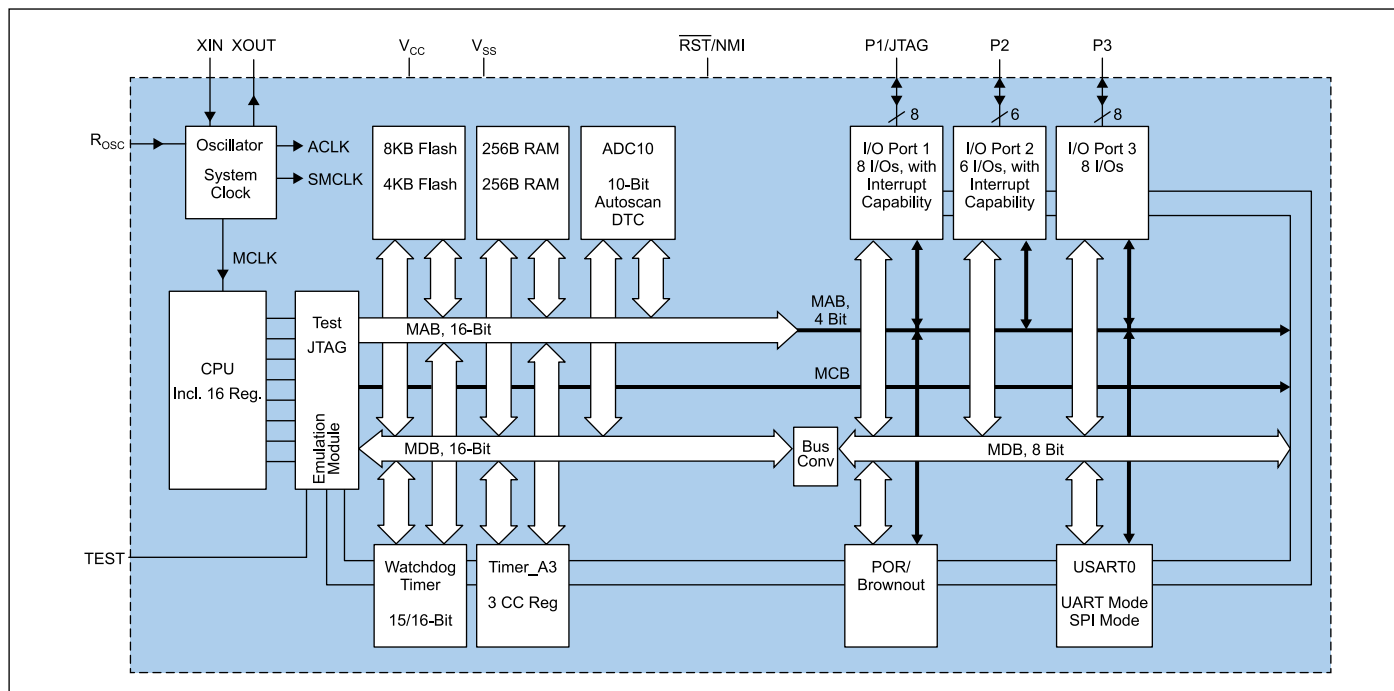


Рис. 9. Структурная схема микросхемы MSP430F1222

мейств tinyAVR, megaAVR, XMEGA AVR, AVR-UC3 (32 бит), а также на основе ARM-ядер. Микросхемы производятся в корпусах на 8–100 выводов. Номенклатура превышает 100 типономиналов.

Интерес представляет серия ATsAD на основе ядра CortexM0+, нацеленная именно на датчиковую тематику и выпускаемая в корпусах небольшого размера. К недостаткам можно отнести АЦП малой разрядности.

Analog Devices

В отличие от Microchip и Atmel компания Analog Devices сделала ставку на микроконтроллеры со встроенными АЦП высокой разрядности. Серии микроконтроллеров ADUC8 и ADUC7 содержат АЦП с разрешением до 24 разрядов, а также ЦАП до 14 разрядов. Причем АЦП и ЦАП высокой разрядности имеются в микросхемах с количеством выводов не более 56 и корпусах размером не более 10×10 мм.

Особого внимания заслуживают микроконтроллеры последних лет на основе ядра ARM Cortex M3. Например, ADUCM320 в BGA-корпусе размером 6×6 мм. Микросхема содержит в своем составе 4 ЦАП с токовым выходом до 150 мА и способна обрабатывать сигналы термохимических селективных датчиков газа.

Общая номенклатура микроконтроллеров от Analog Devices для обработки сигналов датчиков превышает 40 типономиналов.

Texas Instruments

Texas Instruments представляет наиболее широкую линейку микроконтроллеров для обработки сигналов различных датчиков, а также в дополнение к микроконтроллерам выпускает специализированные микросхемы для предварительной обработки этих сигналов.

Общая номенклатура микроконтроллеров, применимых для обработки сигналов датчиков, составляет 510 типономиналов, в том числе 309 типов серии MSP430 и 16 типов со встроенным радиоканалом.

Acam

Фирма Acam резко отличается от всех производителей микросхем для датчиков.

Она выпускает серии TDC, UFC, PicoCAP, PicoStrain, PicoTurn. Эти микросхемы нацелены на создание микроомных преобразователей сигналов датчиков в различных областях измерения потоков и температур (расходомеры). Средняя мощность потребления может составлять менее 3 мВт.

Silicon Labs

Фирма Silicon Labs идет в основном в фарватере Analog Devices с некоторыми особенностями архитектуры встроенных микропроцессоров, что позволяет им устойчиво держать свой сектор рынка.

Общая номенклатура микроконтроллеров от Silicon Labs для обработки сигналов датчиков составляет более 30 типономиналов.

Таким образом, на зарубежном рынке присутствует свыше 800 типов различных микроконтроллеров (с учетом исполнения корпуса и диапазона температур более 2–3 тыс. типономиналов), по своей архитектуре предназначенных для обработки сигналов различных датчиков.

Анализ российского рынка

Согласно данным последнего отчета Информационно-аналитического центра современной электроники (ООО «СОВЭЛ») — «Отчет исследования российского рынка электронных компонентов», в 2017 году прирост рынка составляет 10,5% и достигает \$2652 млн [3]. Рынок компонентов для автомобильной электроники составил \$80 млн, или чуть выше 3%, большая часть из этих устройств — морально устаревшие микросхемы или пассивные компоненты.

Однако косвенная оценка, по соотношению сегментов военной и космической техники по сравнению с сегментами гражданской продукции (там же), и состав выпускаемой продукции с категорией качества «приемка 5» позволяют судить о том, что российский рынок специализированных микроконтроллеров непрерывно расширяется и охватывает новые области применения.

Настало время для разработки и изготовления в России специализированного комплекта микросхем для удаленных интеллектуальных датчиков с жесткими условиями эксплуатации двойного назначения, в первую очередь для отечественных систем управления подвижными объектами сухопутного, воздушного и морского базирования.

Требования к комплекту микросхем для создания интеллектуальных датчиков

Один из факторов, свидетельствующих о развитии элементной базы для обработки сигналов датчиков, — появление широкой номенклатуры микроконтроллеров с развитой периферийной аппаратурой для построения автономных интеллектуальных приборов.

Среди сдерживающих факторов развития микросхем датчиковой тематики в России следует назвать отсутствие сопутствующих микросхем, позволяющих выполнить конструктивно и функционально законченные автономные интеллектуальные модули. К таким микросхемам относятся, кроме специализированных микроконтроллеров, микросхемы микроомных источников питания МИП (до 2 Вт), приемопередатчики последовательных интерфейсов с гальванической развязкой и силовые интеллектуальные исполнительные ключи (до 2–3 А).

Особенности работы удаленных интеллектуальных датчиков

Работа удаленных интеллектуальных датчиков в составе подвижных объектов В и ВТ, тяжелых транспортных машин и промышленных объектов, оснащенных высокоэнергетическим оборудованием, имеет ряд особенностей в части ВВФ. В данном случае к постоянно действующим ВВФ можно отнести такие факторы, как:

- повышенный уровень электромагнитных помех, особенно в низкочастотном диапазоне до 100–200 кГц;
- электромагнитные импульсы, возникающие при коммутации больших токов;
- повышенный уровень помех в цепях питания и коммуникационных цепях.

Это накладывает повышенные требования к реализации как автономных источников питания датчиков, так и к аппаратуре передачи данных и команд.

Нормативная база в сфере систем подвижных объектов

Существует более 40 международных и российских стандартов, регламентирующих требования и методы испытаний на электромагнитную совместимость изделий электронной техники. В первую очередь это относится к источникам питания как ко входным узлам электронной аппаратуры.

Остановимся на некоторых из них, имеющих специфические особенности.

ГОСТ 54073-2010

ГОСТ 54073-2010 «Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии».

Данный стандарт регламентирует качество систем электропитания в стационарных, переходных и аварийных режимах. Распространен также и на системы питания танков, БТР, САУ и другой подвижной военной техники. Особенностью являются требования к переходным режимам.

ГОСТ 28751-90

ГОСТ 28751-90 «Электрооборудование автомобилей. Электромагнитная совместимость. Кондуктивные помехи по цепям питания. Требования и методы испытаний».

Стандарт определяет качество систем электропитания в стационарных, переходных и аварийных режимах бортовых сетей автомобилей. Особенностью требований являются четыре степени жесткости по эмиссии помех. Предусмотрено воздействие семи типов испытательных импульсов.

ГОСТ Р 50607-93

ГОСТ Р 50607-93 «Совместимость технических средств электромагнитная. Электрооборудование автомобилей. Помехи от электростатических разрядов. Требования и методы испытаний».

Документ определяет нормы контактных и воздушных разрядов при испытании изделий для работы на автотранспортных средствах. Особенностью требований являются четыре степени жесткости воздействия импульсов разрядов.

ГОСТ Р 50648-94

ГОСТ Р 50648-94 (МЭК 1000-4-8-93) «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к магнитному полю промышленной частоты. Требования и методы испытаний».

Стандарт регламентирует нормы по магнитному полю промышленной частоты контактных и воздушных разрядов при испытании изделий для работы на автотранспортных средствах. Особенностью требований являются четыре степени жесткости воздействия импульсов разрядов.

Из приведенных примеров стандартов видно, что тема электромагнитной совместимости и устойчивости к электромагнитным помехам во всем мире проработана на высоком уровне, и если вновь создаваемая аппаратура удовлетворяет указанным требованиям, то, как правило, это высоконадежная аппаратура.

Что такое комплект микросхем для датчиков

Решаемые задачи

Комплект микросхем для создания удаленных интеллектуальных датчиков должен решать оптимальным способом, с минимальным количеством внешних пассивных компонентов и микросхем широкого применения и при минимальных габаритах и потребляемой мощности, следующие задачи.

1. Питание чувствительных элементов — датчиков физических величин, стабилизация рабочей точки чувствительного элемента, в том числе и с помощью ЦАП (цифровыми методами).
2. Измерение сигналов чувствительных элементов и перевод их в цифровую форму с помощью АЦП.
3. Цифровая обработка измеренного сигнала: фильтрация, линеаризация, нормализация, калибровка.
4. Передача результатов измерения в линию связи (в цифровом или аналоговом виде).
5. Выполнение заданного алгоритма включения/выключения датчика, управления сопряженными механическими устройствами (по необходимости).
6. Обеспечение гарантированного питания схемы датчика в широком диапазоне входных напряжений, в том числе и в допустимых аварийных переходных режимах.
7. Обеспечение передачи данных в систему сбора телеметрической информации во всем диапазоне помех на линиях связи, защиту приемопередатчиков от высокочастотных помех.

8. Перечисленные задачи могут быть решены даже в рамках одной микросхемы. При оптимизации цены разработки и производства, а также с целью покрытия широкого ряда задач с помощью минимального исходного количества микросхем целесообразно выпустить набор микросхем. При этом стоимость набора должна быть оптимальной для решения большинства задач в подвижных объектах.

По всей видимости, задачи 1–5 могут быть решены посредством разработки и изготовления унифицированного ряда микроконтроллеров, отличающихся набором периферийных модулей для обработки сигналов чувствительных элементов.

Задача 6 может быть решена путем разработки одной микросхемы с выходной мощностью до 2 Вт.

Задача 7 уже решается с помощью приемопередатчиков различных интерфейсов. Дополнительно в составе микроконтроллера может быть выполнен приемопередатчик, описанный в разделе «Контроллер DC-PLC», для сокращения элементов обвески схемы датчика.

Общие требования к комплекту микросхем

1. Комплектность. Набор микросхем (одна микросхема) должен позволять создавать конструктивно и функционально законченные интеллектуальные датчики, со встроенными последовательными интерфейсами и узлами питания от бортовых низковольтных сетей постоянного и переменного тока.
2. Универсальность. Набор микросхем (одна микросхема) должен позволять создавать датчики измерения различных физических величин с высокой точностью и передавать данные с применением различных интерфейсов, как аналоговых, так и цифровых.
3. Малогабаритность. Набор микросхем (одна микросхема) должен позволять создавать датчики с минимальными габаритами электронной части и с минимальным возможным потреблением.

4. Адаптивность к системам сбора информации. Набор микросхем (одна микросхема) должен позволять создавать датчики, предусматривающие их включение в различные системы сбора информации без дополнительных действий по калибровке и установлению адресов и приоритетов.

5. Типы измеряемых величин. Набор микросхем (одна микросхема) должен позволять создавать конструктивно и функционально законченные датчики измерения следующих типов физических величин:

- линейные и угловые перемещения, в том числе и БВК (бесконтактные концевые выключатели) на индуктивном, емкостном, магнитном и ультразвуковом принципах измерения;
- датчики усилий, давления и механического напряжения, также основанные на различных физических принципах;
- расходомеры жидкостей и газов;
- уровнемеры и датчики измерения объемов;
- датчики угловых и линейных ускорений, инклинометры;
- датчики химических веществ, в том числе и селективные.

Таким образом, микроконтроллеры для датчиковой тематики должны содержать в своем составе несколько электронных узлов, — например, от двух-трех до десяти, — оптимизированных для обработки сигналов первичных преобразователей физических величин без дополнительных внешних активных навесных элементов.

Примеры микросхем питания от мировых производителей

Защита от импульсных помех

Одно из простейших решений по защите входов ИП предлагает фирма Maxim [1]. Это ряд специализированных микросхем — ограничителей напряжения (MAX6495–MAX6499). Микросхемы с внешним мощным NMOS-транзистором позволяют защитить нагрузку как от входного перенапряжения, так и от переплюсовки. Резисторы R1 и R2 задают порог срабатывания защиты от перенапряжения (рис. 10).

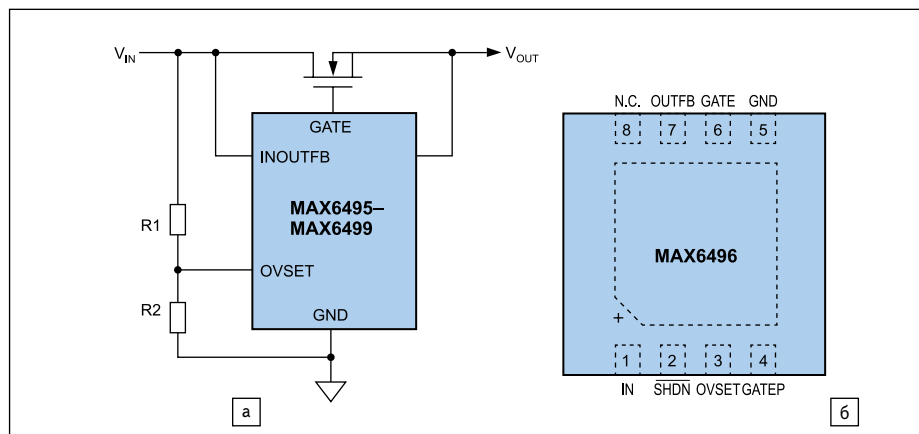


Рис. 10. Микросхемы MAX6495–MAX6499: а) типовая схема включения; б) схема их корпуса



Рис. 11. Внешний вид модуля защиты от перенапряжения FIAM1C21

Такое решение целесообразно применять для защиты устройств с малым и сверхмалым потреблением 0,25–10...20 Вт.

Для защиты устройств большей мощности принято либо использование специальных защитных модулей, как, например, предлагает фирма VICOR (рис. 11), либо подобная защита осуществляется комбинацией пассивных входных фильтров с помощью более высоковольтной элементной базы, позволяющей гарантированно выдерживать импульсы по цепям питания, сглаженные входными фильтрами. Такое решение традиционно для модулей питания российского производства.

Входные фильтры-аттенуаторы семейства FIAM (Filter Input Attenuator Module) применяются для подавления кондуктивных электромагнитных помех, а также для защиты DC/DC-конвертеров от входных импульсных перенапряжений и ограничения пусковых токов. Модули FIAM помогают с минимальными затратами создать источник питания, соответствующий высоким требованиям по электромагнитной совместимости и устойчивости к входным импульсным возмущениям миллисекундной длительности.

Встроенный источник питания

Самыми лучшими на сегодня удельными характеристиками обладают модули питания от «Александр-Электрик», наименьший по размерам модуль имеет габариты 30×20×10 мм (примерно 6 см³) с выходной мощностью 3 Вт. По техническим характеристикам это соответствует, например, модулю WPC03R24D05 от Power Electronics Division (Americas).

Тем не менее современные требования к малогабаритным интеллектуальным датчикам заставляют разработчиков уменьшать размеры узлов питания. Это возможно по причине малой потребляемой мощности датчиком в целом. У современных датчиков данная величина составляет менее 200–300 мВт, даже с учетом интерфейса.

Подобные решения требуют появления на рынке элементной базы сверхмалогаба-

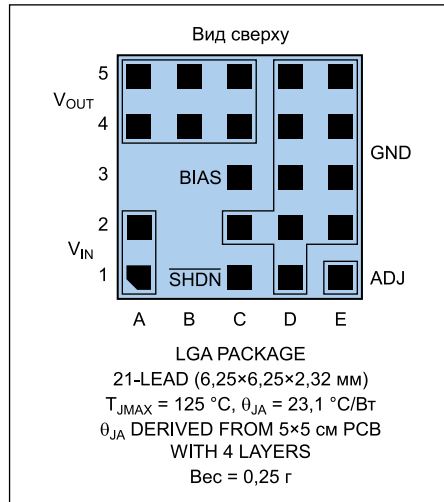


Рис. 12. Схема расположения контактов модуля питания LTM8020

ритных источников питания с выходной мощностью ниже 1 Вт и объемом менее 2 см³.

Частично перечисленным условиям (нет защиты от импульсов и переполюсовки) удовлетворяет модуль LTM8020 (рис. 12), при габаритах 6,25×6,25×2,32 мм (менее 0,1 см³) характеризующийся выходной мощностью до 1 Вт и нуждающийся всего в трех элементах внешней обвязки размером не более 0603. То есть на основе этого модуля можно построить источник питания объемом менее 1 см³, полностью соответствующий регламентам для электрооборудования В и ВТ. Чертеж модуля приведен на рис. 3

Примеры решения малоомощных импульсных стабилизаторов

Микросхемы серии LNK30х

Техническое решение импульсного стабилизатора без гальванической развязки с повышенным входным напряжением можно рассмотреть на примере микросхем LinkSwitch-TN Family от Power Integrations (LNK302–LNK306). На основе приведенных микросхем реализуются импульсные источники питания с выходной мощностью от 0,25 Вт до нескольких ватт. Подробное описание применения этих микросхем приведено в Application Note AN-37, April 2009. Отметим, что данные микросхемы выполнены по высоковольтной технологии со встроенными транзисторами на рабочее напряжение до 700 В.

Микросхема с питанием от борт-сети 27 В

Для организации питания от сети +27 В с допустимыми перенапряжениями до 90 В оптимальна микросхема LM5019 от TI, изготавливаемая по высоковольтной DMOS-технологии. Без каких-либо дополнительных защитных устройств, кроме диода защиты от переполюсовки, микросхема позволяет выполнить на ее основе блок питания мощностью до 1 Вт на площади менее 1 см². КПД при номинальном напряжении 24 В и токе нагрузки 60–80 мА составляет не менее 80%, то есть в номинальном режиме микросхема рассеивает не более 200 мВт и не требует специальных мер по отводу тепла.

Внутренняя структура микросхемы LM5019 показана на рис. 13.

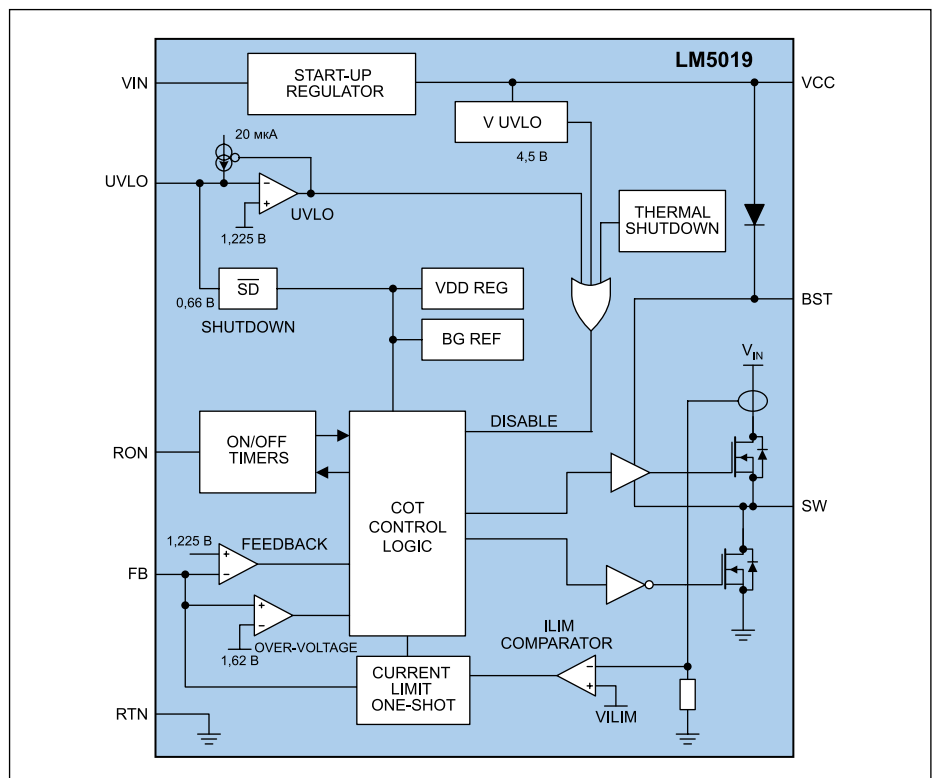


Рис. 13. Структурная схема микросхемы LM5019

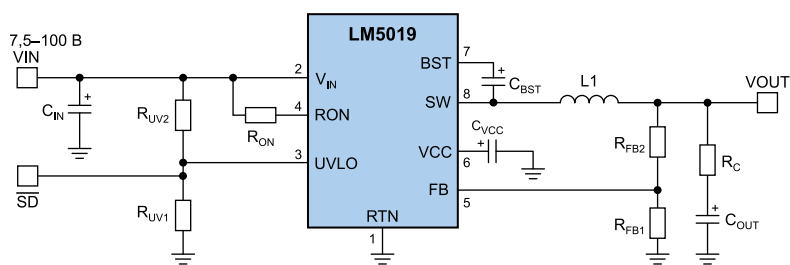


Рис. 14. Типовая схема включения микросхемы LM5019

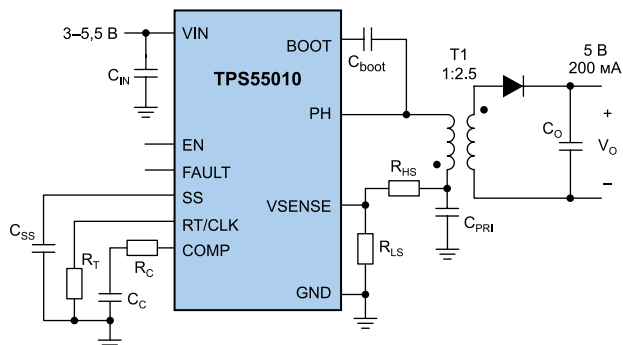


Рис. 15. Типовая схема включения импульсного стабилизатора

Типовая схема включения микросхемы приведена на рис. 14. Схема содержит: входной конденсатор фильтра C_{IN} , выходной фильтр $L1$ C_{OUT} , резисторы обратной связи R_{FB1} и R_{FB2} и пассивные навесные элементы, которые, согласно описанию для микросхемы, необходимы для ее корректной работы.

Микросхема TPS55010

Texas Instruments предлагает в микросхеме TPS55010 очень оригинальное техническое решение для микросхем источников питания с широким диапазоном входных напряжений и токов нагрузки без организации непосредственной цепи обратной связи. В данной микросхеме введена обратная связь по напряжению обратного хода силового трансформатора при его «закоротке» по переменному току. Такое решение позволяет точно отследить выходное напряжение и сэкономить на элементах цепи обратной связи с необходимой развязкой на оптопаре или ином приборе передачи аналогового сигнала через изолирующий барьер. Размер корпуса микросхемы 3×3 мм, соответственно, весь модуль питания можно выполнить в весьма малом объеме.

Типовая схема включения импульсного стабилизатора приведена на рис. 15.

Внутренняя структура узла импульсного стабилизатора показана на примере структуры микросхемы TPS55010 (рис. 16).

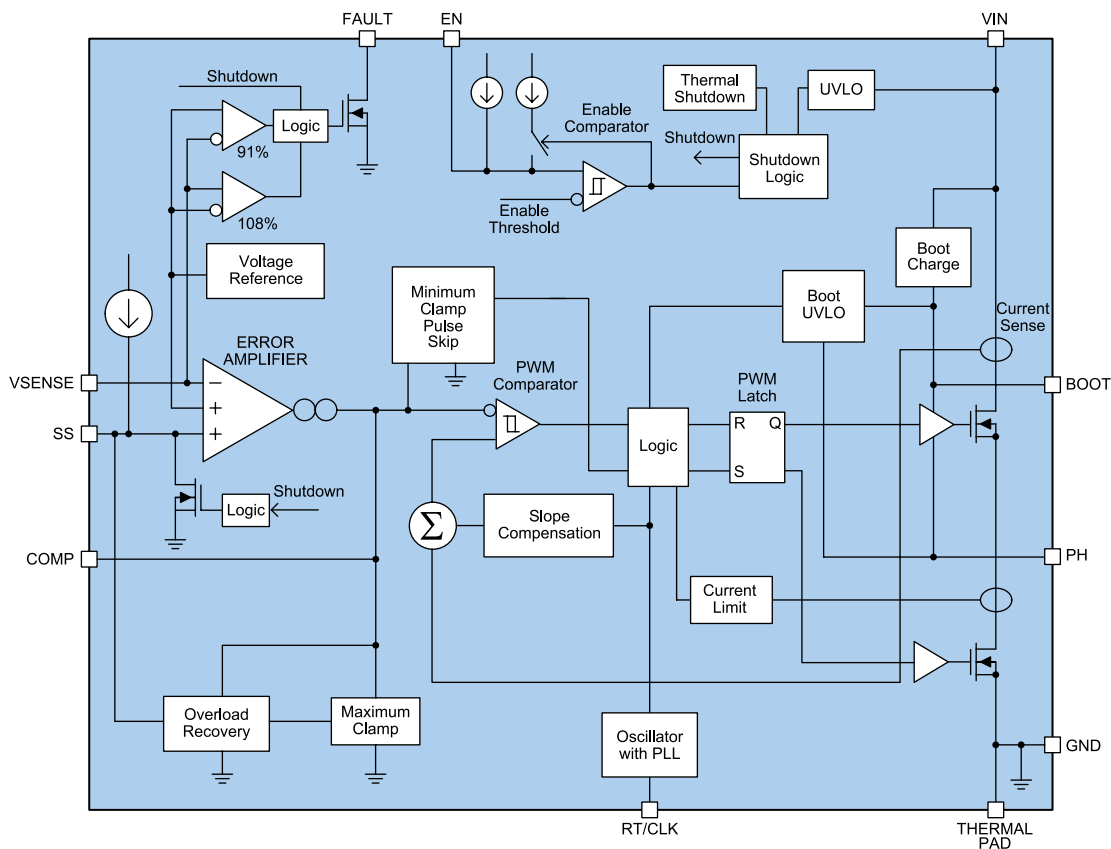


Рис. 16. Структурная схема микросхемы TPS55010

Таблица 2. Преимущества и недостатки разных способов передачи данных от удаленных датчиков

№ способа	Преимущества	Недостатки
№ 1	Самый простой способ передачи измеряемой величины.	Низкая точность (как правило, не выше 0,25%), слабая помехозащищенность.
№ 2	Наиболее распространенный способ передачи аналогового представления аналоговой величины, существуют стандарты на диапазон выходного сигнала 4–20 или 0–10 мА. Возможна двухпроводная система.	Кроме некоторой сложности реализации, является лучшим способом среди аналоговых методов передачи аналоговых сигналов измерения.
№ 3	Альтернативный способ цифрового кодирования, обеспечивает высокую точность и помехоустойчивость.	Низкая скорость передачи измеренных сигналов.
№ 4	Возможность передачи любой информации в кодированном виде.	Обязательное наличие контроллера какого-либо интерфейса.
№ 5	Возможность двухпроводной системы (питание и информация по одним проводам).	Отсутствие национальных и международных стандартов.

Узлы (микросхемы) передачи данных

Наиболее простое решение по организации интерфейса с удаленным интеллектуальным датчиком — применение микросхем со встроенной гальванической развязкой. Например, с использованием микросхемы ADuM1201. При потребляемой мощности не более 20 мВт она помогает организовать полнодуплексный канал передачи данных со скоростью до 10 Мбит/с. При этом габаритный объем микросхемы менее 0,06 см³, аналогичных микросборок российского производства нет!

Поскольку микросхемам с гальванической развязкой ежегодно посвящается несколько статей в нашем журнале, то в данной статье этот вопрос не рассматривается.

Силовые ключи

Иногда в датчиках возникает необходимость управлять вспомогательными механизмами и устройствами. Например, защитной заслонкой, подогревателем или подобным устройством. Для сокращения количества проводов, подсоединенных к датчику, в интеллектуальных датчиках устанавливают силовые устройства, управляемые от микроконтроллера датчика. Для сопряжения выходных управляющих сигналов микроконтроллеров с исполнительными механизмами и устройствами появляется потребность в силовых ключах с выходными токами, как правило, не более 2–3 А. Целесообразно разработать как минимум два типа силовых ключей:

- ключи с вытекающим током, для управления заземленными нагрузками;
- ключи с втекающим током для управления нагрузками, присоединенными к шине питания.

В мире сегодня существует более десяти фирм, которые специализируются на полупроводниковой продукции и выпускают более 400–500 наименований интеллектуальных силовых ключей (Smart Power Switch). К этим фирмам можно отнести такие известные компании, как Siemens, Fairchild, International Rectifier. Описание и морфология наименований интеллектуальных силовых ключей — тема отдельной статьи, поэтому остановимся на особенностях использования Smart Power Switch в интеллектуальных датчиках.

Кроме сокращения количества проводов, применение Smart Power Switch в интел-

лектуальных датчиках повышает их надежность за счет того, что данные приборы, имея встроенную защиту, «спасают» не только себя, но и подключенную к ним нагрузку и позволяют проводить раннюю диагностику силовых узлов датчиков. При этом также снижаются габариты и вес устройств.

К сожалению, в России не выпускаются полноценные интеллектуальные датчики, и в случае повышенных требований к аппаратуре разработчики вынуждены выполнять подобные силовые узлы с помощью большого количества навесных элементов и таких ресурсов микроконтроллера, как АЦП.

Контроллеры последовательных интерфейсов

Одним из важнейших моментов в создании комплекта микросхем для датчиковой тематики является выбор интерфейсов для организации локальных сетей сбора информации.

Сегодня в мире существуют самые разнообразные последовательные интерфейсы различного назначения:

- внутриблочные интерфейсы: AGP, EISA, ISA, LPC, MBus, MCA, NVLink, NuBus, PCI, PCIe, PCI-X, Q-Bus, SBUS, SMBus, VLB, VMEbus, XT-Bus, Zorro III и др.;
- интерфейсы накопителей информации: ST-506, ESDI, ATA, eSATA, Fibre Channel, HIPPI, NVMe, SAS, SATA, SCSI и др.;
- универсальные интерфейсы: Futurebus, InfiniBand, Omni-Path, QuickRing, SCI, RapidIO, IEEE-488, Thunderbolt (Light Peak) и др.;
- периферийные интерфейсы: 1-Wire, ADB, I²C, IEEE_1284 (LPT), IEEE 1394 (FireWire), Multibus, PS/2, UART (RS-232, RS-485), SPI, USB и др.

Несмотря на столь широкое многообразие интерфейсов и стандартов, в подвижных объектах массово прижилось их небольшое количество — лишь те, для которых выпускаются высоконадежные микросхемы приемопередатчиков.

Для организации передачи сигналов в цифровом виде от датчиков к устройствам сбора данных или к ЦВЭМ на расстояниях более 2–3 м в 99% случаев применяется один из перечисленных интерфейсов — UART-RS-232, UART-RS-485 или CAN-2.0. Это обусловлено тем, что, во-первых, пока редко исполь-

зуются датчики с цифровыми выходами, а во-вторых, российская промышленность не выпускает удобного комплекта микросхем для реализации какого-либо интерфейса, кроме указанных выше.

Сравнение различных интерфейсов для датчиков

В современной аппаратуре подвижных объектов данные от удаленных датчиков передаются следующими способами:

- № 1. В аналоговом виде с отображением сигнала по постоянному напряжению.
- № 2. В аналоговом виде с отображением сигнала по постоянному току.
- № 3. Логическим сигналом с преобразованием входного сигнала в частоту.
- № 4. С помощью последовательного интерфейса по выделенной линии.
- № 5. С помощью последовательного интерфейса по силовым проводам.

Причем способы № 4 и 5 являются цифровыми методами передачи данных и позволяют организовать сбор информации по схеме «точка-точка» или «звезда», как с непрерывной передачей данных, так и по запросу от ведущего устройства.

В таблице 2 показаны преимущества и недостатки приведенных способов.

Технология PLC

Технология передачи данных по силовым проводам (PLC, Power line communication) в последнее время получила широкое развитие благодаря снижению стоимости высокопроизводительных периферийных микроконтроллеров и бурному развитию «Интернета вещей», чья концепция была сформулирована в 1999 году. Почти 100 лет назад PLC зародилась как технология передачи диспетчерской информации от одного энергоузла к другому, но ее бурный рост начался с развитием телекоммуникаций. За это время скорость передачи данных увеличилась с телеграфных 150–300 бод до 500 Мбит/с в стандарте HomePlug AV. Технология PLC разделилась на несколько направлений: передача высокоскоростного Интернета; передача телеметрии на средние расстояния до 1–2 км; передача телеметрии по линиям высоковольтных ЛЭП.

И наконец, настало время внедрения технологий PLC в информационно-управляющие системы подвижных и стационарных объектов, в первую очередь в линиях сбора информации от удаленных датчиков.

Основное преимущество этой технологии перед существующими способами сбора информации — сокращение количества проводов и количества контактов в многочисленных разъемах между удаленными датчиками и центральным устройством сбора информации (концентратор данных и сигналов управления). Появляется возможность дублирования линий связи и повышается надежность системы в целом.

Таблица 3. Свойства канальных кодов

Характеристика	Формула	Miller	M2	8/10	8/12
Избыточность кода	$R_{ch} = (m-n)/m$	0,5	0,5	1/5	1/3
Скорость канального кода	$V_{ch} = m/n$	0,5	0,5	4/5	2/3
Период частоты канального кода (окно детектирования)	$T_{ch} = 1/V_{ch}$	0,5T	0,5T	0,8T	0,66T
Минимальный интервал	T_{min}	1,0T	1,0T	0,8T	1,33T
Максимальный интервал	T_{max}	2,0T	3,0T	3,2T	4,0T
Максимальная частота 1-й гармоники	$F = 1/2 T_{min}$	0,5	0,5	0,625	0,375

Таблица 4. Параметры канальных кодов

Длина	Последовательность	Коэффициент расширения спектра, дБ	Скорость кодирования, %
В-7	1110010	8,45	14,28
В-11	11100010010	10,41	9,09
В-13	1111100110101	11,76	7,69
24	100100111111000110001010	13,8	4,17
34	1010010011001110101100111100000101	15,31	2,94

Особенности передачи данных по силовым проводам в подвижных объектах

В отличие от силовых сетей в объектах гражданского назначения, особенно электросетей жилых зданий, в которых может быть установлена бытовая техника и электроприборы, где уровень излучаемых электромагнитных помех довольно высок и часто превосходит нормы, установленные для сетей подобного типа (например, пылесосы и электродрели), в подвижных объектах обеспечивается электромагнитная скрытность, в том числе и за счет снижения помех по силовым сетям. Поэтому сети изделий В и ВТ максимально приспособлены для внедрения в них технологий PLC, особенно сети постоянного тока напряжением 12/24 В.

При передаче данных по силовым проводам применяют канальное кодирование данных с целью самосинхронизации данных, устранения постоянной составляющей в сигнале и получения заданного спектра.

Наиболее часто используют коды Миллера (1,3 RLL) и M2 (модифицированный код Миллера), код 8/10 и код 8/12, обладающие свойствами, приведенными в таблице 3.

Код 8/12 имеет минимум 2 «1» или 2 «0» на подряд, тем самым его спектр обладает минимальной шириной при заданной скорости передачи.

Спектры некоторых кодов показаны на рис. 17.

Парциальное кодирование используют для концентрации мощности около центральной частоты 1/4T: ее недостаток — трехуровневый сигнал.

Из таблицы 3 и графиков спектра (рис. 17) видно, что коды MFM и M2 при своей простоте и при условии не критичности по занимаемому энергетическому спектру обладают одним недостатком — ширина окна детектирования. По данному параметру самым лучшим является код 8/10, а по занимаемому спектру — код 8/12. Несмотря на эти факты, выигрыш кода 8/10 перед MFM-кодом при одном и том же уровне ошибок составляет не более 2–3 дБ. При среднем уровне шума в силовых сетях +27 В не более 200 мВ на частотах свыше 15 кГц и амплитуде сигнала передачи данных не менее 1 В код 8/10 покажет среднюю величину BER не более 10^{-6} , а MFM-код — не более $10^{-4,5}$, что вполне приемлемо для передачи пакетов данных длиной не более 64 бит (типичная длина пакета данных от одного удаленного датчика).

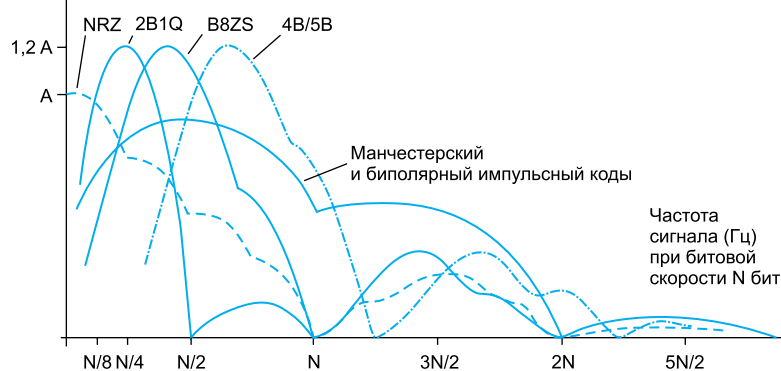


Рис. 17. Спектры канальных кодов

При необходимости повышения достоверности передачи небольших пакетов данных размером до 8–32 байт данные можно защитить проверочным словом CRC, как это сделано в интерфейсе CAN-2.0, или применить избыточное помехозащищенное (и, возможно, криптозащищенное) кодирование.

Для работы в сильно зашумленных линиях связи, в том числе в силовых линиях, в контроллере DC-PLC должно быть предусмотрено канальное кодирование данных с помощью следующих видов канального кода, кроме указанных выше:

- БЧХ(31,16) — канальная скорость кодирования 52%;
- коды Баркера;
- коды Бронна (коды, описанные в [1]).

Виды последовательностей, коэффициенты расширения спектра и скорость кодирования этих кодов приведены в таблице 4.

Приведенные коды позволяют устойчиво передавать данные при соотношении S/N до 6–8 дБ. То есть в линиях со средним значением шума до 500 мВ уверенно передаются сигналы с напряжениями 200 мВ, благодаря чему удается избежать увеличения излучаемых помех подвижными объектами (электромагнитная скрытность).

Программное обеспечение систем сбора информации в подвижных объектах

В данном цикле статей мы не будем рассматривать современные интерфейсы сбора данных и передачи команд управления, поскольку эта тема широко раскрыта в много-

численных публикациях по промышленным стандартам, основанных на стандартах, перечисленных выше.

Отметим только, что один из недостатков Ethernet-протокола IEEE82.3 — сложность организации системы реального времени — решается с помощью различных программных надстроек, таких как EtherNet/IP, PROFINET, EtherCAT, PowerLink, и других. Возможно и капсулирование пакетов Ethernet в PDH (плезеохронные цифровые иерархии), которые обеспечивают доставку данных за гарантированное время [4].

Заключение

В настоящий момент назрела необходимость разработки российского комплекта микросхем для построения систем управления подвижными объектами на основе унифицированных интеллектуальных датчиков.

Для выполнения этой задачи необходимо более тесное взаимодействие производителей микросхем и аппаратуры с обсуждением проектов создания комплектов перспективных микросхем. Причем подобные дискуссии имеет смысл вести в открытой печати (или на форумах), без привязки к конкретным предприятиям, и доводить результаты до сведения организаций-заказчиков, делая это в виде открытого письма с анализом рынка перспективных потребностей. Иначе, идя по пути прямого импортозамещения, мы на всю жизнь обеспечим себя гарантированным отставанием от лидеров данного рынка.

Литература

1. Бронов С. А., Малеев А. В., Михайленко Я. В. Синтез уникальных фазоманипулированных сигналов для интеллектуальной системы обнаружения подвижных объектов. www.jurnal.org/articles/2008/izmer9.html
2. Перспективы автомобильной электроники: точка зрения поставщиков материалов. Редакционный обзор. Источник: Cigal J.-C., Shuttleworth G. The Automotive Electronics Market: A View from a Material Supplier. Solid State Technology. The Pulse, June 16, 2017. www.electroiq.com/blog/2017/06/the-automotiveelectronics-market-a-view-from-a-material-supplier // Зарубежная электронная техника. Вып. 14 от 13.07.2017.
3. G.707 Network node interface for the synchronous digital hierarchy (SDH). www.itu.int/rec/T-REC-G.707/en
4. PDH (Плещиохронная цифровая иерархия) Википедия. www.wikipedia.org/wiki/Плещиохронная_цифровая_иерархия
5. Лопухов И. Сети Real-Time Ethernet: от теории к практической реализации // Современные технологии автоматизации. 2010. № 3.
6. Maamoun M., Member IAENG, Arami S., Beguenane R., Benbelkacem A., Meraghni A. A 3ps Resolution Time-to-digital Converter in Low-cost FPGA for Laser. WCE 2017, July 5–7, 2017, London, U. K.
7. www.pmt-fl.com/downloads/tdc/DB_GP22_en.pdf