

Особенности аналоговых интерфейсов датчиков

Часть 1

Олег Дворников, Владимир Чеховский, Валентин Дятлов (г. Минск, Беларусь), Николай Прокопенко (г. Шахты, Ростовская обл.)

В статье сформулированы основные требования к микроэлектронным интерфейсам датчиков, приведены схемотехнические решения и параметры серийно выпускаемых ИС для обработки сигналов датчиков.

ВВЕДЕНИЕ

По оценкам специалистов, одним из приоритетных направлений развития аналоговых ИС является разработка и серийное изготовление специализированных ИС для электронных преобразователей физических величин и средств измерений на основе:

- фотоприёмников импульсного оптического излучения;
- детекторов частиц и ионизирующих излучений;
- чувствительных элементов ёмкостного, пьезоэлектрического и резистивного типов.

Рыночная ниша для такой продукции имеется в космическом приборостроении, ядерной электронике, медицинской технике и аппаратуре для мониторинга окружающей среды [1]. Актуальность создания микроэлектронных интерфейсов датчиков стимулировала проведение работ по проектированию, изготовлению и испытаниям специализированных аналоговых ИС, в том числе радиационно-стойких, для датчиков различных типов [1–5].

Целью настоящей статьи является формулирование основных требова-

ний к микроэлектронным интерфейсам датчиков, изучение особенностей схемотехнических решений и параметров серийно выпускаемых ИС для обработки сигналов датчиков.

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ИНТЕРФЕЙСАМ ДАТЧИКОВ

В действующих ГОСТ [6, 7] и научно-технических документах по метрологии [8, 9] некоторые термины и определения, касающиеся датчиков и их параметров, в той или иной степени отличаются. В основном нормативном документе РМГ 29-99 [9] датчиком называют конструктивно обособленный первичный измерительный преобразователь, от которого поступают сигналы измерительной информации.

Необходимо различать термины «датчик» и «чувствительный элемент», под которым понимают часть измерительного преобразователя, воспринимающую входную величину [9]. В зарубежной литературе обычно датчик и чувствительный элемент обозначают одним термином *sensor*, а отсутствие в чувствительном элементе выходного электрического сигнала уточняют указанием на:

- вид изменяемого электрического параметра (*capacitive sensor* – чувствительный элемент, в котором под действием внешнего воздействия изменяется ёмкость; *resistive sensor* – чувствительный элемент с изменением сопротивления при внешнем воздействии);
 - отсутствие источника смещения/питания (*unbiased capacitive sensor* – ёмкостный чувствительный элемент без источника смещения/питания).
- Для упрощения понимания структурных и электрических схем зару-

бежных интерфейсов далее будут использоваться наиболее употребляемые в зарубежной научно-технической информации термины, в том числе [10, 11]:

- пассивный датчик – датчик, который не нуждается в дополнительном источнике энергии; он преобразует энергию внешнего сигнала в выходной сигнал (термопары, фотодиоды, пьезоэлектрические чувствительные элементы);
- активный (параметрический) датчик – датчик, для работы которого требуется внешняя энергия, называемая сигналом возбуждения (*drive signal*);
- датчик с выходным сигналом в виде напряжения (*Voltage Sensor*), тока (*Current Sensor*) или заряда (*Charge Sensor*);
- чувствительные элементы, в которых внешнее воздействие изменяет электрическую ёмкость (*Capacitive Sensor*) или сопротивление (*Resistive Sensor*).

Основные параметры датчиков описываются передаточной функцией (см. рис. 1), которая устанавливает взаимосвязь $S = f(s)$ между выходным электрическим сигналом (S) и внешним воздействием (s). Эта функция может быть как линейной, так и нелинейной. Одномерную линейную функцию (связывающую выходной сигнал только с одним внешним воздействием) можно представить в виде [10]:

$$S = a + bs, \quad (1)$$

где a – постоянная составляющая, b – наклон (чувствительность), S – характеристика электрического сигнала (напряжения, тока, заряда), которую системы сбора данных воспринимают в качестве выходного сигнала датчика (амплитуда, частота, фаза).

Передаточная функция также описывает параметры чувствительных элементов при наличии сигнала возбуждения, например, выходной сигнал

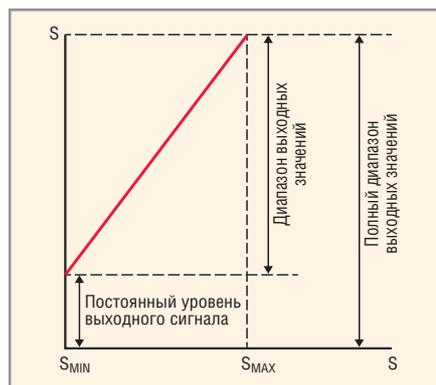


Рис. 1. Передаточная функция датчика

мостовой схемы, в плечах которой включены чувствительные резистивные или ёмкостные элементы. По передаточной функции можно определить [10, 11]:

- постоянный уровень выходного сигнала (Offset);
- диапазон выходных значений (Full Span Output, FSO) – разность между электрическими выходными сигналами, измеренными при максимальном и минимальном внешнем воздействии;
- полный диапазон выходных значений (Full Scale, FS), $FS = Offset + FSO$;
- диапазон измеряемых значений (s_{max}) – максимально возможное значение входного сигнала, которое датчик может преобразовать в электрический сигнал, не выходя за пределы допустимой погрешности.

В большинстве радиоэлектронных систем (см. рис. 2) сигналы датчиков оцифровывают с помощью аналого-цифровых преобразователей (analog-digital converter, ADC). Однако между датчиком и аналого-цифровым преобразователем (АЦП) всегда включают специальную схему, т.н. аналоговый интерфейс, к которой предъявляют ряд требований [10, 12]:

- осуществление защиты входа от перегрузки;
- обнаружение неисправности датчика;
- выполнение усиления (amplification) и сдвига постоянного уровня выходного напряжения для согласования диапазона выходных значений датчика FSO с диапазоном входного напряжения АЦП;
- линеаризация (linearization) передаточной характеристики датчика, т.е. обеспечение постоянной чувствительности системы датчик – интерфейс в требуемом диапазоне входных воздействий;
- компенсация (compensation) температурного изменения основных характеристик системы датчик – интерфейс, в том числе, постоянного уровня выходного напряжения, чувствительности и диапазона выходных значений;
- ограничение полосы пропускания (bandwidth limiting) с помощью фильтра нижних частот (low-pass filter, LPF).

Ограничение полосы пропускания применяется, с одной стороны, чтобы улучшить отношение сигнал/шум, а с другой стороны, чтобы уменьшить ис-

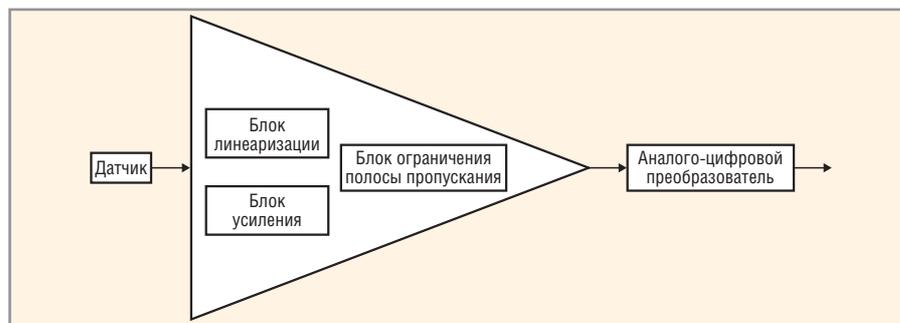


Рис. 2. Структурная схема канала обработки сигналов датчиков

кажения сигнала в том случае, когда частота выходного сигнала интерфейса превышает половину частоты дискретизации АЦП.

Заметим, что линеаризацию передаточной функции датчика часто осуществляют после преобразования сигнала в цифровую форму, хотя её выполнение затрудняет наличие у некоторых датчиков гистерезиса (различия значений выходного сигнала для одного и того же входного сигнала, полученного при его возрастании и убывании) и технологического разброса параметров. Температурную компенсацию также можно выполнять при цифровой обработке, однако её реализация возможна и за счёт изменения сигнала возбуждения или подстройки выходного сигнала датчика.

ОСОБЕННОСТИ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ИНТЕРФЕЙСОВ К УДАЛЁННЫМ ДАТЧИКАМ

Обычно при работе с удалёнными датчиками основное внимание уделя-

ют уменьшению влияния синфазных помех, для чего интерфейс выполняют с дифференциальным входом и высоким коэффициентом ослабления синфазного сигнала (КОСС). В то же время, крайне необходимы правильная топология шин нулевого потенциала (заземления) и обеспечение защиты входа от перегрузки напряжением, возникающей при электростатическом разряде (Electro-Static Discharge, ESD), электромагнитных помехах (Electromagnetic Interference, EMI) и/или повреждении датчика [13].

На рисунке 3 показаны предпочтительные схемы включения удалённого датчика, обозначенного как источник сигнала V_S , в случае заземлённого (отрицательный вывод источника сигнала соединён с «землёй» датчика на рисунке 3а) и «плавающего» (оба вывода источника сигнала не соединены с его «землёй» на рисунке 3б) источника сигнала [13]. Эти схемы подключения, совместно с дифференциальными или инструментальными усилителями,

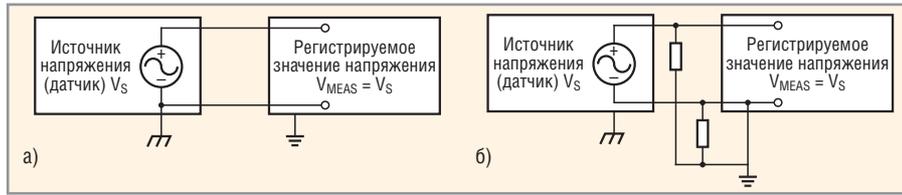


Рис. 3. Рекомендуемые схемы заземления удалённых датчиков

а – с «заземлённым» датчиком; б – с «плавающим» датчиком

обеспечивают двухпроводные дифференциальные измерения. При дифференциальных измерениях необходимо, чтобы уровень синфазного напряжения источника сигнала не превышал максимально допустимый уровень входного напряжения усилителей. Как показано на рисунке 3б, введение дополнительных резисторов позволяет установить известный уровень синфазного напряжения, причём резисторы не влияют на величину полезного сигнала, если их сопротивление достаточно велико.

Как правило, при работе с удалёнными датчиками на печатных платах интерфейсов устанавливают входные фильтры, которые одновременно осуществляют защиту от EMI/ESD и уменьшают уровень синфазных наводок (см. рис. 4).

Обычно входные фильтры выполняют на ферритовых кольцах, проходных конденсаторах (C_4, C_5 на рисунке 4), пассивных RC-фильтров (R_1C_1 и R_2C_2), ограничителях переходного напряжения (transient voltage suppressor, TVS), в том числе, на стабилитронах (D_1, D_2). Только стабилитроны ограничивают входное напряжение ИС на безопасном уровне, остальные элементы ограничивают скорость изменения напряжения. Хотя TVS-приборы подобны стабилитронам, они предназначены для быстрого включения и рассеивания энергии импульса напряжения малой длительности и большой величины. Стабилитроны, напротив, предназначены для ограничения установившегося напряжения, поэтому во многих случаях применяется комбинация защитных элементов. При выборе элементов R_1C_1 и R_2C_2 необходимо учитывать, что они образуют подавляющий наводки фильтр нижних частот (ФНЧ), полоса пропускания которого по синфазному f_{CM-3dB} и дифференциальному f_{-3dB} сигналам составляет [13]:

$$f_{CM-3dB} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1},$$

$$f_{CM-3dB} = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}, \quad (2)$$

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi(R_1 + R_2) \left(\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} + C_3 \right)}. \quad (3)$$

Элементы R_1, R_2 и C_1, C_2 должны иметь максимально идентичные номиналы. Рекомендуется, чтобы сопротивление резисторов отличалось не более чем на 1%, ёмкость конденсаторов – на 5%. Конденсатор C_3 не только образует ФНЧ для дифференциального сигнала, но и уменьшает влияние неидентичности отношений R_1/C_1 и R_2/C_2 на КОСС, что является крайне важным при дифференциальном включении датчика, т.к. различие отношений R_1/C_1 и R_2/C_2 приводит к ухудшению КОСС на переменном токе.

ИНТЕРФЕЙСЫ ДАТЧИКОВ НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

В настоящее время наибольшее применение находят датчики с выходным сигналом в виде напряжения, тока или заряда, а также ёмкостные и резистивные чувствительные элементы.

Обработка сигналов указанных устройств осуществляется с помощью схем на основе операционных усилителей (ОУ) [11], в том числе:

- для датчиков с выходным сигналом в виде напряжения – инвертирующими и неинвертирующими усилителями напряжения, повторителями напряжения с большим входным сопротивлением, дифференциальными и инструментальными усилителями, усилителями с изменяемым коэффициентом передачи;
- для датчиков с выходным токовым сигналом – трансимпедансными и логарифмирующими усилителями;
- для датчиков с выходным зарядовым сигналом – усилителями напряжения и заряда;
- для ёмкостных чувствительных элементов – преобразователями ёмкости в частоту колебаний или длитель-

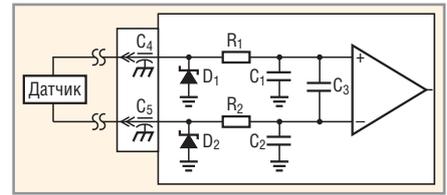


Рис. 4. Схема включения удалённого датчика с защитными элементами

ность фронта/спада сигнала в напряжение, интеграторами тока;

- для резистивных чувствительных элементов – преобразователями сопротивления в напряжение, ток, частоту колебаний или длительность фронта/спада.

Чаще всего применяются мостовые схемы включения для преобразования изменяемого параметра чувствительных ёмкостных и резистивных элементов в напряжение, а также трансимпедансные и дифференциальные (инструментальные) усилители напряжения. При этом существенное улучшение параметров аналоговых интерфейсов датчиков достигается за счёт включения цифровых потенциометров [14, 15]. Ниже приведены упрощённые схемы интерфейсов на ОУ и полные схемы, содержащие цифровые потенциометры.

Так, в трансимпедансном усилителе для фотодиодов (см. рис. 5) один из цифровых потенциометров обеспечивает подстройку в широком диапазоне коэффициента преобразования тока в напряжение, а второй – высокоточную установку нулевого уровня постоянного выходного напряжения. Два цифровых потенциометра применяются для подстройки нулевого выходного уровня и диапазона выходных значений в датчике давления, показанном на рисунке 6, и датчике температуры с платиновым терморезистивным элементом (platinum resistance temperature detector, PRTD) на рисунке 7.

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Особенностью пьезоэлектрических чувствительных элементов является то, что они генерируют заряд под действием механического напряжения, но чувствительны только к изменению усилий, а не к их постоянному уровню, т.е. пьезоэлектрические чувствительные элементы – это устройства переменного, а не постоянного тока [10, 16].

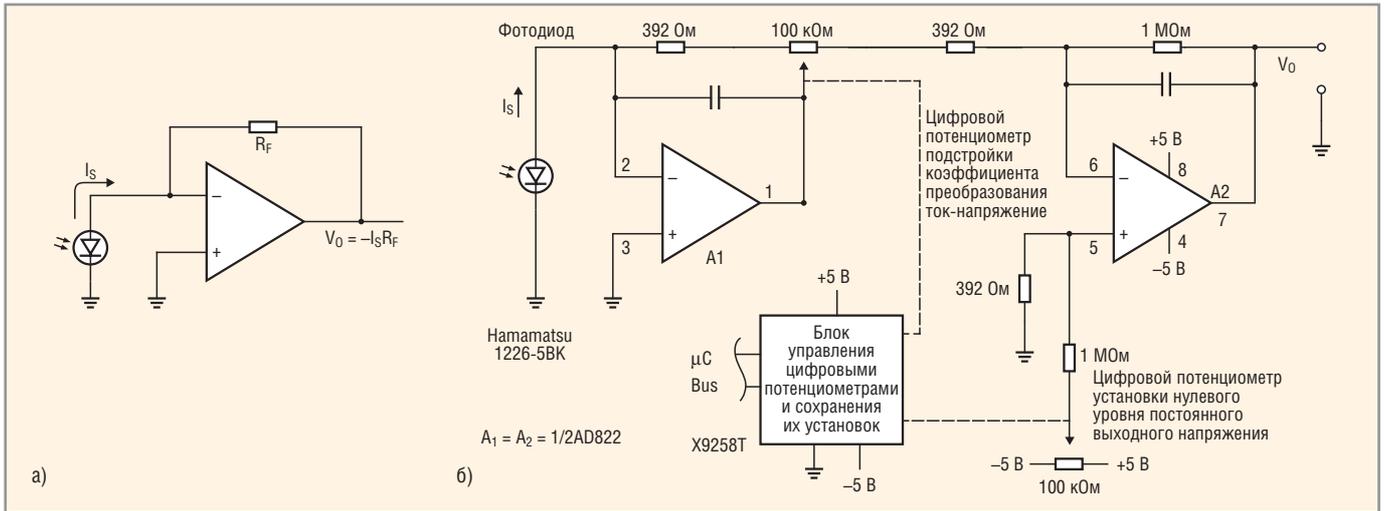


Рис. 5. Схема подключения фотозлектрического датчика

а – упрощённая; б – с использованием цифровых потенциометров

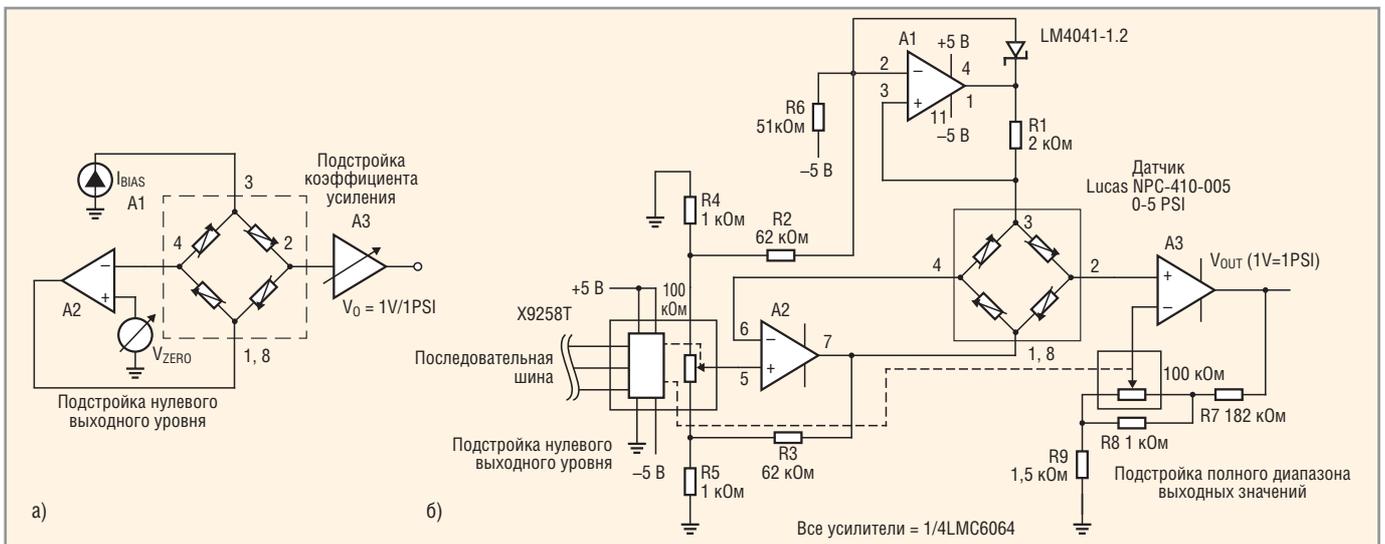


Рис. 6. Схема подключения датчика давления

а – упрощённая; б – с использованием цифровых потенциометров

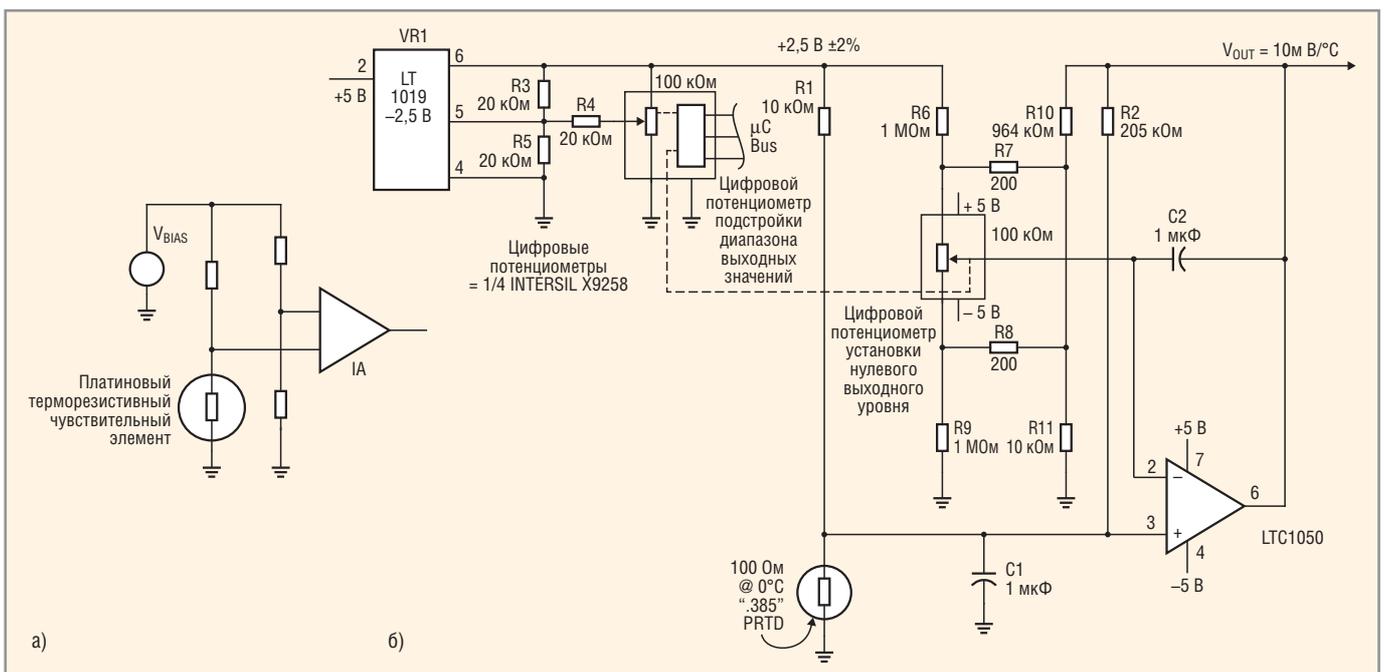


Рис. 7. Схема подключения платинового терморезистивного чувствительного элемента

а – упрощённая; б – с использованием цифровых потенциометров

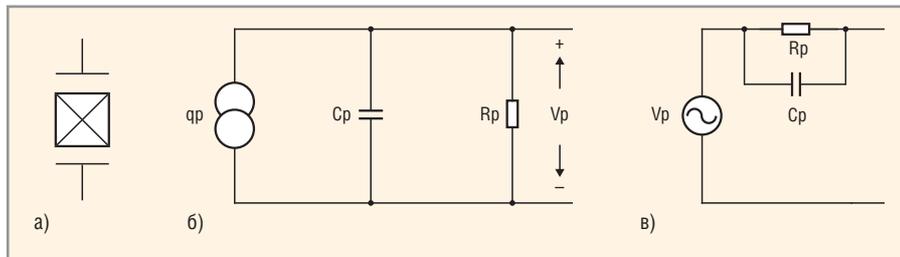


Рис. 8. Пьезоэлектрический чувствительный элемент

а) условное графическое обозначение; б) модель с источником заряда; в) модель с источником напряжения

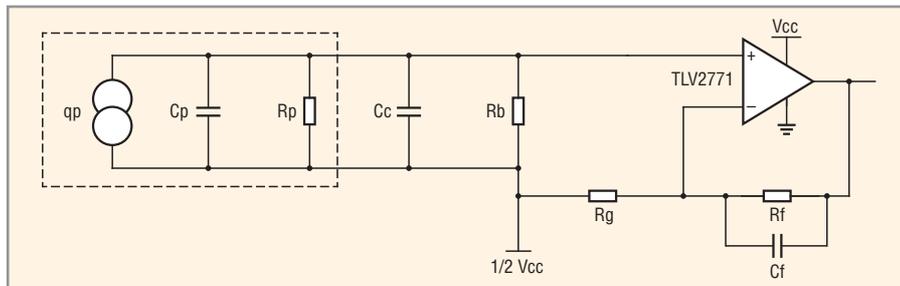


Рис. 9. Обработка сигнала пьезоэлектрического чувствительного элемента с помощью усилителя напряжения

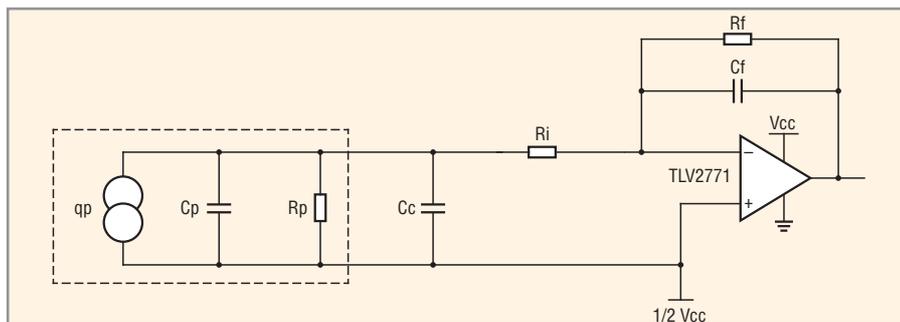


Рис. 10. Обработка сигнала пьезоэлектрического чувствительного элемента с помощью ЗЧУ

При схемотехническом моделировании пьезоэлектрический чувствительный элемент (см. рис. 8а) обычно представляют в виде источника заряда Q_P (см. рис. 8б) с параллельно соединёнными конденсатором C_P и резистором R_P или в виде источника переменного напряжения V_P с последовательно подключенной к нему цепочкой $C_P \parallel R_P$ (см. рис. 8в). Величина генерируемого чувствительным элементом заряда зависит от пьезоэлектрической постоянной, ёмкость C_P определяется площадью электродов, толщиной кристалла и диэлектрической постоянной материала, а R_P характеризует ток утечки, приводящий к нейтрализации статического заряда [10].

Обработку сигнала обычно выполняют с помощью усилителя напряжения, когда пьезоэлектрический чувствительный элемент расположен очень близко от усилителя, или зарядочувствительного усилителя (ЗЧУ) при удалённом чувствительном элементе.

При использовании усилителя напряжения (см. рис. 9) генерируемый заряд интегрируется на ёмкости чувствительного элемента и суммарной ёмкости (C_C) соединительных кабелей и паразитной ёмкости монтажа. Таким образом, заряд пьезоэлектрического элемента преобразуется во входное напряжение, которое усиливается в K_V раз ОУ с замкнутой цепью отрицательной обратной связи (ООС). Резистор R_B образует цепь для протекания постоянного входного тока ОУ, а конденсатор C_F обеспечивает спад АЧХ на требуемой частоте. Величину R_B обычно выбирают максимально возможной, с учётом того, что падение напряжения на R_B , создаваемое входным током ОУ, усиливается в K_V раз и уменьшает динамический диапазон выходного напряжения.

Работу усилителя напряжения, приведённого на рисунке 9, описывают соотношения:

$$V_{OUT} = \frac{V_{CC}}{2} + \frac{Q_P}{C_P + C_C} \left(1 + \frac{R_F}{R_G} \right), \quad (4)$$

$$K_V = \left(1 + \frac{R_F}{R_G} \right), \quad (5)$$

$$f_L = \frac{1}{2\pi(R_P \parallel R_B)(C_P \parallel C_C)}, \quad (6)$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi R_F C_F}, \quad (7)$$

где V_{OUT} – выходное напряжение, V_{CC} – напряжение источника питания, R_F, R_G, R_B – сопротивления резисторов на рисунке 9, K_V – коэффициент усиления напряжения ОУ с замкнутой ООС, f_L, f_H – частота среза АЧХ в области нижних и верхних частот.

Такая схема включения очень чувствительна к величине паразитной ёмкости монтажа и соединительных кабелей. Обработку сигнала с помощью ЗЧУ поясняет рисунок 10. Действие ООС операционного усилителя приводит к равенству потенциалов на его входах, при этом ёмкости C_P, C_C не перезаряжаются, а весь заряд, генерируемый чувствительным элементом, заряжает ёмкость C_F и вызывает появление импульса напряжения на выходе ЗЧУ. Резистор R_F образует цепь для протекания постоянного входного тока ОУ, а также восстанавливает начальный уровень выходного напряжения после завершения интегрирования входного заряда, R_I защищает вход при воздействии перегрузки. Основные параметры ЗЧУ определяются как:

$$V_{OUT} = \frac{V_{CC}}{2} - \frac{Q_P}{C_F}, \quad (8)$$

$$K_{QV} = -\frac{1}{C_F}, \quad (9)$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi R_I (C_P + C_C)}, \quad (10)$$

$$f_L = \frac{1}{2\pi R_F C_F}, \quad (11)$$

где K_{QV} – коэффициент преобразования входного заряда в выходное напряжение.

Основным преимуществом схемы включения пьезоэлектрического чувствительного элемента, показанной на рисунке 10, является независимость выходного напряжения от величины паразитной ёмкости монтажа и соединительных кабелей.

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ МИКРОСХЕМЫ ИНТЕРФЕЙСОВ

Несмотря на то что устройства обработки сигналов на основе ОУ не вы-

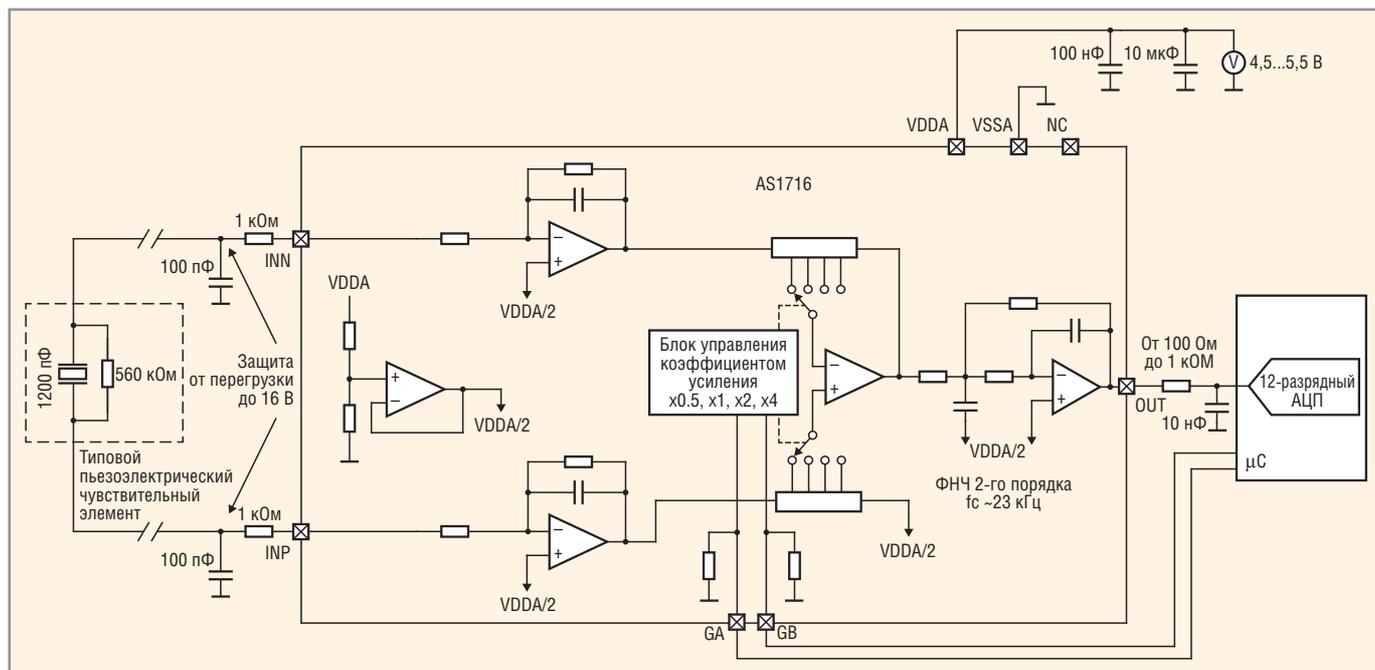


Рис. 11. Упрощённая схема ИС AS1716 и схема её подключения

зывают проблем у разработчиков, для уменьшения массогабаритных параметров и энергопотребления радиоэлектронных систем в ряде случаев целесообразно использовать специализированные микросхемы интерфейсов, рассмотренные ниже.

ИНТЕРФЕЙС ДЛЯ ЁМКОСТНОГО ДАТЧИКА AS1716

Микросхема AS1716 [17] (см. рис. 11) выполняет функцию аналогового интерфейса между ёмкостным чувствительным элементом и АЦП с устройством выборки-хранения на входе.

Микросхема AS1716 содержит:

- дифференциальный входной каскад, состоящий из двух ФНЧ первого порядка. На выходы микросхемы INN и INP через внутренние резисторы с сопротивлением около 50 кОм поступает напряжение, равное $V_{DDA}/2$, для питания чувствительного элемента (внешние резисторы с сопротивлением 1 кОм и конденсаторы ёмкостью 100 пФ осуществляют защиту входного каскада от напряжения перегрузки до 16 В);
- каскад преобразования дифференциального сигнала в однофазный;
- усилитель с программируемым коэффициентом передачи, выбираемым из ряда значений: 0,5; 1; 2 и 4 В/В;
- ФНЧ второго порядка с полосой пропускания от 16 до 29 кГц.

Микросхема ориентирована на обработку сигналов пьезоэлектрических

чувствительных элементов, которые генерируют напряжение при механических ударах и характеризуются следующими типовыми параметрами: эквивалентное сопротивление датчика от 0,5 до 1 МОм, эквивалентная ёмкость от 0,9 до 1,5 нФ.

Преимущества микросхемы AS1716 являются КОСС более 55 дБ и способность работы на нагрузку из последовательного соединения резистора с сопротивлением от 100 Ом до 1 кОм и конденсатора с ёмкостью до 10 нФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дворников О. Универсальная аналоговая микросхема для датчиков космической аппаратуры. Современная электроника. 2011. № 3. С. 56-65.
2. Прокопенко Н.Н. Элементная база радиационно-стойких информационно-измерительных систем. Шахты: ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2011.
3. Дворников О.В. Влияние гамма-излучения на элементы аналоговых интегральных схем. Доклады БГУИР. 2012. № 3 (65). С. 56-62.
4. Дворников О.В. Обеспечение радиационной стойкости аналоговых интегральных схем. Доклады БГУИР. 2012. № 4 (66). С. 105-110.
5. Абрамов И.И. Проектирование аналоговых микросхем для прецизионных измерительных систем. Минск: Акад. упр. при Президенте Респ. Беларусь, 2006.
6. ГОСТ Р 51086-97. Датчики и преобразователи физических величин электронные. Термины и определения.

7. ГОСТ Р 8.673-2009. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения.

8. Международный словарь по метрологии: основные и общие понятия и соответствующие термины. НПО «Профессионал», 2010.

9. РМГ 29-99. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения.

10. Фрайден Дж. Современные датчики: Справочник. Техносфера, 2005.

11. Blake K. Analog Sensor Conditioning Circuits – An Overview. Microchip Technology Inc. AN990.

12. Falk A. Low-Power Signal Conditioning for a Pressure Sensor. Texas Instruments, Application Report SLAA034, 1998.

13. Lepkowski J. Temperature Measurement Circuits for Embedded Applications. Microchip Technology Inc. AN929.

14. Рудико Л. Цифровые потенциометры. Компоненты и технологии. 2001. № 5. С. 50.

15. Woodward S. Sensor Circuits and Digitally Controlled Potentiometers. Intersil, Application Note 135 (<http://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/an13/an135.pdf>).

16. Karkei J. Signal Conditioning Piezoelectric Sensors. Texas Instruments, Application Report. SLOA033A, 2000.

17. AS1716. Capacitive Sensor Interface (www.austriamicrosystems.com/Capacitive-Sensors/AS1716).

