

ИНТЕРФЕЙСНЫЕ СХЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Сигнал от ЧЭ, измерительной схемы или датчика в целом может передаваться в устройство обработки данных в цифровом или в аналоговом виде. Цифровая передача является более эффективной с точки зрения помехозащищенности. Однако, на выходе измерительной цепи сигнал всегда аналоговый, и его необходимо передать к АЦП по более или менее длинной линии. Промежуточным звеном между датчиком и устройством обработки данных является *интерфейсная схема*, преобразующая выходной сигнал датчика в формат устройства обработки данных. Входной импеданс интерфейсной

схемы $Z_{\text{и}} = \frac{R_{\text{и}}}{1 + j\omega R_{\text{и}} C_{\text{и}}}$ различен для высоких и низких частот. Так, на низких частотах, схема обла-

дает сравнительно малой входной емкостью, и ее импеданс определяется главным образом активной составляющей. Поэтому на низких частотах $Z_{\text{и}} \approx R_{\text{и}}$. С ростом частоты сигнала $Z_{\text{и}}$ уменьшается. Для обеспечения эффективной передачи сигнала от датчика к устройству обработки данных необходимо согласовать характеристики интерфейсной схемы с параметрами конкретного датчика. Т.к. входное напряжение схемы зависит от частоты $U_{\text{вх}} = \mathcal{E} / \sqrt{1 + (f/f_{\text{гсх}})^2}$, то для передачи сигнала, например от резистивного датчика (он относится к датчикам первого порядка) к интерфейсной схеме с погрешностью не более 1 % граничная частота $f_{\text{гсх}}$ схемы должна превышать $f_{\text{г}}$ датчика в 7 раз:

$$f_{\text{гсх}} \geq 7f_{\text{г}}$$

Обычно на входе интерфейсной схемы установлен ИУ, который имеет ограниченную ширину полосы пропускания. Поэтому при построении интерфейсных схем стремятся использовать быстродействующие элементы для обеспечения максимально широкополосного канал передачи сигналов.

1. Аналоговые схемы передачи сигналов

В зависимости от типа соединений различают двух-, четырех- и шестипроводные способы передачи сигналов.

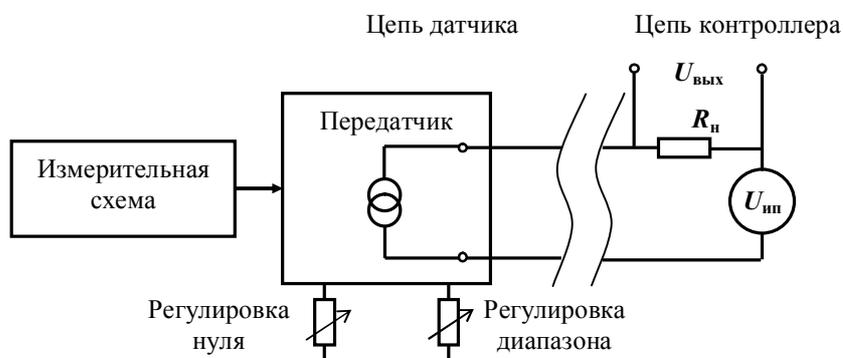


Рис. 2.21. Двухпроводной канал передачи аналоговых данных

Двухпроводные аналоговые каналы передачи данных (передатчики) используются для сопряжения датчиков с соответствующими контроллерами в промышленных системах управления технологическими процессами. По двухпроводной линии можно передавать сигнал в форме напряжения или тока. В качестве промышленного стандарта обычно используют ток, изменяющийся в пределах 4...20 мА, который позволяет отображать весь диапазон внешних сигналов: 4 мА соответствует нулевому внешнему сигналу, 20 мА — максимальному. В схеме на рис. 2.21 связь между датчиком и контроллером осуществляется при помощи двух проводов. Для этого на выход измерительной цепи подключается так называемый двухпроводной передатчик, в роли которого может выступать преобразователь напряжения в ток, конвертирующий сигнал датчика в ток. Со стороны контроллера подсоединяется источник напряжения, обеспечивающий передачу тока до 20 мА. Такая схема, получившая название «токовой петли», состоит из измерительной цепи датчика, передатчика, источника питания и последовательно включенного сопротивления нагрузки. При изменении сигнала датчика меняется и выходное сопротивление передатчика, что приводит к модуляции тока в диапазоне 4...20 мА. Питание измерительной цепи и

передатчика осуществляется непосредственно током сигнала, минимальное значение которого составляет 4 мА. Информационным сигналом в схеме является падение напряжения на сопротивлении нагрузки R_n , расположенном на стороне контроллера. Достоинство двухпроводной передачи — независимость величины тока от сопротивления соединительных проводов, т.е. от длины линии связи.

Довольно часто датчик имеет достаточно низкое сопротивление (к примеру, резистивный датчик температуры или пьезодатчик), а подключать его приходится к удаленной интерфейсной схеме. В этом случае, сопротивление соединительных проводов оказывается соизмеримым с собственным сопротивлением датчика и начинает влиять на напряжение питания измерительной цепи. Для устранения этого влияния применяют так называемый четырёхпроводный передатчик (рис. 2.22), который позволяет измерять сопротивление удаленной резистивной измерительной цепи без учета сопротивления соединительных проводов. В этой схеме два провода подсоединяются к источнику тока, а два оставшихся провода — к вольтметру. Источник постоянного тока, как уже отмечалось, имеет очень высокий выходной импеданс, поэтому ток в цепи практически не зависит от сопротивлений проводов. Вольтметр имеет очень высокий входной импеданс, поэтому ток из токового контура через него практически не течет. Падение напряжения на ЧЭ Z_d равно $U_{\text{вых}} = Z_d I_{\text{инп}}$ и не зависит от сопротивлений R_1, R_2, R_3 и R_4 соединительных проводов.

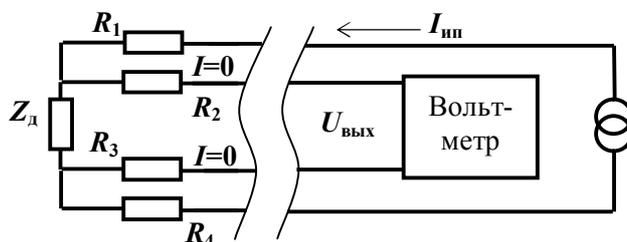


Рис. 2.22. Четырёхпроводной канал передачи аналоговых данных

Четырёхпроводный канал передачи данных часто используется в промышленных системах управления.

При удаленном подключении мостовой резистивной схемы для обеспечения постоянства напряжения питания моста используют шестипроводный канал передачи данных (рис. 2.23). В этой схеме два провода питают мостовую схему напряжением, а еще два провода служат для измерения напряжения в диагонали моста. Вольтметр, имеющий высокий входной импеданс и незначительный входной ток, измеряет действующее напряжение питания $U_{\text{инп}}$ и дифференциальное выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ моста. При таком способе подключения исключается влияние сопротивления соединительных проводов.

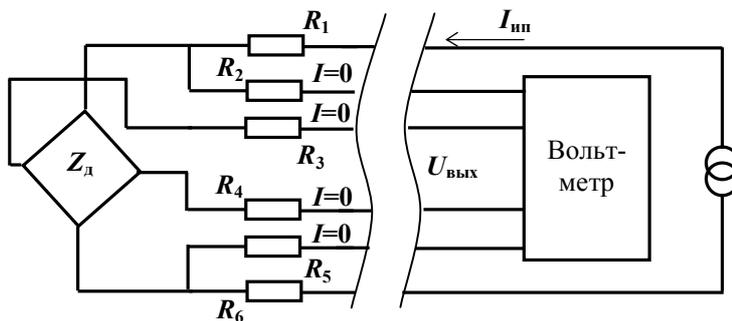


Рис. 2.23. Шестипроводной канал передачи аналоговых данных

2. Способы защиты от шумов в датчиках и интерфейсных схемах

Шумы в измерительных и интерфейсных схемах датчиков являются источниками погрешностей. Можно выделить две основные группы шумов: собственные (внутрисхемные) шумы и вносимые шумы (интерференционные помехи), источники которых находятся за пределами схемы.

Как уже отмечалось ранее, отклонения сигнала датчика от истинного значения могут быть либо сис-

тематическими, либо стохастическими (случайными). Первый тип погрешностей зависит от вида передаточной функции датчика, его линейности, динамических характеристик и т.д. Общим для всех систематических погрешностей является то, что все они определяются конструкциями датчиков, производственными допусками, качеством материалов и калибровкой. Все перечисленные характеристики могут быть описаны математически и определены экспериментально. Стохастические погрешности наоборот носят случайный характер, являются непредсказуемыми и могут меняться очень быстро. Их обычно называют шумами.

Собственные шумы, как правило, подчиняются закону Гаусса, в то время как вносимые трудно описать статистическими методами. Они могут быть периодическими, нерегулярно повторяющимися и случайными. Обычно их удается значительно снизить, используя фильтрацию, развязку электрических цепей, *экранирование* проводников и компонентов, исключение паразитных контуров заземления использование малозумящих источников питания и др. В таблице 2.10 приведены некоторые источники вносимых помех, их типичные значения и способы борьбы с ними.

Таблица 2.10

Некоторые источники вносимого шума

Внешние источники	Типичные значения	Способы борьбы
Источники питания с частотой 50 Гц	100 пА	Экранирование, исключение паразитных контуров заземления, изоляция источников питания
Импульсные источники питания с частотой 100 Гц	3 мкВ	Фильтрация
Броски напряжения на частоте 150 Гц от трансформаторов, работающих на частоте 50 Гц	0,7 мкВ	Изменение пространственной ориентации компонентов
Радиостанции	1 мВ	Экранирование
Искрение при переключении	1 мВ	Фильтрация частоты 5-100 МГц, исключение паразитных контуров заземления и экранирование
Вибрации	10 пА (10 – 100 Гц)	Контроль механических соединений
Вибрации кабеля	100 пА	Использование малозумящих кабелей
Печатные платы (токи утечки)	До 10 пА (ниже 10 Гц)	Очистка платы, тефлоновая изоляция

Чаще всего электрические помехи попадают в схему через паразитные емкости, существующие практически везде. Так, человек, стоящий на диэлектрическом покрытии, и земля образуют емкость более 500 пФ, а паразитная емкость между электродами оптронной пары превышает 3 пФ.

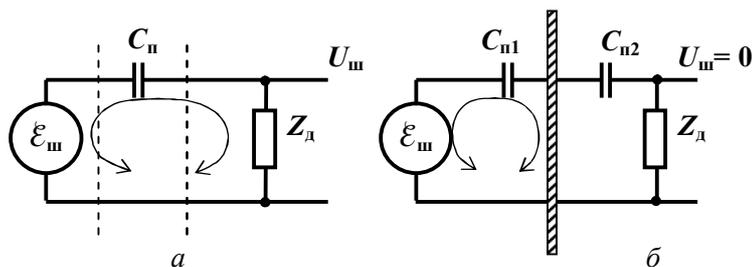


Рис. 2.24. Емкостная связь (а) и электрическое экранирование (б)

На рис. 2.24, а показана емкостная связь между источником электрического шума $\mathcal{E}_ш$ и датчиком с внутренним импедансом Z_d через переходной конденсатор C_n . Импеданс датчика может быть чисто резистивным или комбинированным. Напряжение на датчике зависит от частоты шума, величины паразитной емкости C_n и импеданса Z_d . Например, внутренний *импеданс* пьезоэлектрического детектора можно представить в виде параллельного соединения конденсатора 30 пФ и резистора 50 ГОм. Если такой датчик через конденсатор 1 пФ присоединить к движущемуся человеку, тело которого обладает поверхностным электростатическим зарядом, может возникнуть статическое напряжение величиной до 1000 В. Если предположить, что частота движений человека составляет 1 Гц, наводка на датчике при этом будет равна 30 В, что в 3...5 раз выше величины полезного сигнала датчика.

2.1. Электрическое экранирование

Помехи, вызванные электрическими полями, можно значительно снизить при правильном экранировании датчика и интерфейсных схем, особенно их высокоимпедансных и нелинейных компонентов. При этом важно заметить, что некорректное экранирование может только уменьшить точность датчика. Правильно проведенное экранирование ограничивает распространение шума в соседние схемы (рис. 2.24, б). Если источники помех находятся внутри самого устройства, экраны выполняются в виде металлических коробов и размещаются только над критичными участками. Шумы электрической природы эффективно гасятся металлическими корпусами, поскольку заряд не может существовать на внутренней поверхности замкнутой проводящей поверхности. Источником шума, как правило, является элемент схемы, на котором образуется переменный электрический потенциал. В результате возникшей емкостной связи появляется напряжение $U_{ш}$. Ток и напряжения шума равны соответственно:

$$I_{ш} = \frac{U_{ш}}{Z + Z_{п}}, \quad U_{ш} = \frac{\mathcal{E}_{ш}}{1 + \frac{Z_{п}}{Z}}$$

где $\mathcal{E}_{ш}$ — ЭДС шума, $Z_{п}$ — импеданс паразитной емкости на рабочей частоте.

Например, при $C_{п} = 2.5$ пФ, $Z_{д} = 10$ кОм, и $\mathcal{E}_{ш} = 100$ мВ, на частоте 1,3 МГц выходной шум составит 20 мВ. При использовании электрического экрана ток образуется только в левой части схемы, а в правой части ток будет равен нулю, т.к. в ней отсутствуют источники сигналов. Поэтому, напряжение шума на импедансе $Z_{д}$ также оказывается равным нулю.

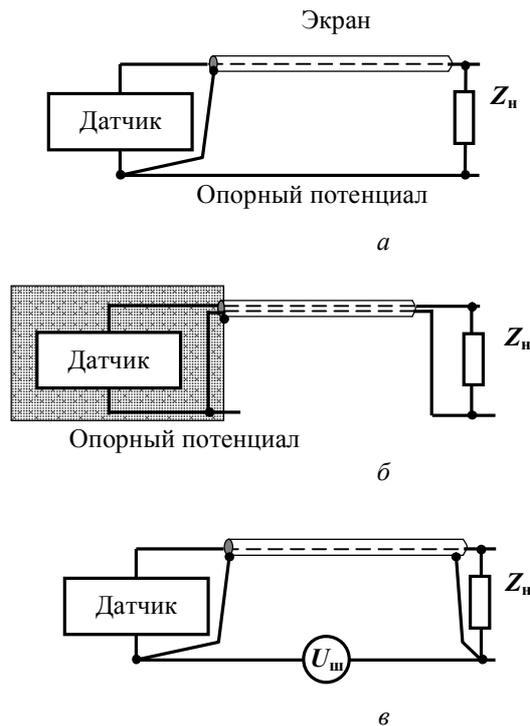


Рис. 2.25. Правильное (а, б) и неправильное (в) подсоединение сигнального кабеля к линии с опорным потенциалом

При экранировании схем необходимо соблюдать следующие требования:

1. Электростатический экран следует подсоединять к внутренней точке защищаемой схемы, имеющей определенный опорный потенциал. (Его часто используют при организации «сигнальной земли»). Если один из сигнальных выводов датчика подсоединен к земле, экран также должен быть соединен с землей. Если ни один из выводов датчика не подключен к точке заземления, заземлять экран бесполезно.
2. При использовании экранированных проводов их экранировка должна быть подсоединена к точке с опорным потенциалом только со стороны источника сигнала (рис 2.25, а).
3. Если экран разбит на секции, экраны всех секций должны соединяться последовательно. К линии с

опорным потенциалом секционный экран подсоединяется в единственной точке — со стороны датчика.

4. Количество независимых экранов должно быть равно числу измеряемых сигналов. Каждая сигнальная линия должна иметь свой собственный экран. Экраны разных линий не должны контактировать друг с другом, если только они не используют общий опорный потенциал (сигнальную «землю»). В этом случае все соединения выполняют отдельными проводами, подсоединенными к каждому экрану только в одной точке.

5. Если датчик размещен в экранированном корпусе, а данные передаются через экранированные кабели (рис. 2.25, б), их экранировка должна быть подсоединена к корпусу. Для этого часто внутри экрана используют отдельный проводник с опорным потенциалом («сигнальной землей»).

6. Экран следует заземлять только в одной точке, желательно рядом с датчиком. Экранированный кабель нельзя заземлять с двух сторон (рис. 2.25, в), поскольку разность потенциалов между двумя точками заземления $U_{ш}$ может привести к возникновению тока в экране $I_{п}$, который благодаря магнитной связи может индуцировать паразитное напряжение на центральный проводник.

7. Не следует подавать на экран потенциал, отличный от опорного, т.к. напряжение с экрана передается на центральный проводник через емкость кабеля.

8. При одновременной передаче аналоговых и цифровых сигналов для уменьшения индуктивности подсоединение экрана к земле необходимо вести короткими проводами.

2.2. Экранирование от магнитных полей

Помехи от магнитных полей, в отличие от электростатических и электрических гораздо труднее поддаются экранированию, т.к. они проникают внутрь проводящих материалов. Обычный экран, размещенный вокруг проводника и заземленный на одном конце, очень слабо защищает проводник от наведенных магнитными полями напряжений. Когда магнитное поле индукции B проникает внутрь экрана, его амплитуда падает экспоненциально (рис. 2.26). Глубину проникновения поля внутрь экрана (скин-слой) определяют как толщину слоя, в котором происходит ослабление магнитного поля на 37 % по сравнению с его величиной в воздухе. На высоких частотах толщина скин-слоя практически одинакова для разных металлов, в то время как на низких для построения экранов предпочтительнее применять сталь (см. табл. 2.11). На высоких частотах также часто используют магнитные экраны из толстой стали.

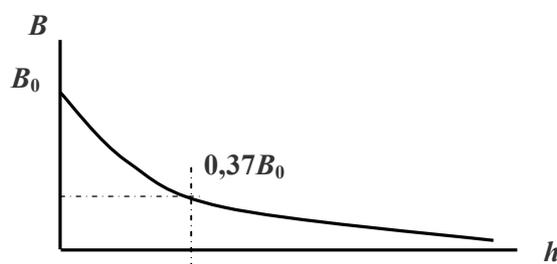


Рис. 2.26. Зависимость защитных свойств магнитного экрана от его толщины h

Таблица 2.11

Зависимость толщины скин-слоя от частоты сигнала

Частота	Медь	Алюминий	Сталь
60 Гц	8,5	10,9	0,86
100 Гц	6,6	8,5	0,66
1 кГц	2,1	2,7	0,20
10 кГц	0,66	0,84	0,08
100 кГц	0,2	0,3	0,02
1 МГц	0,08	0,08	0,008

При защите от магнитных помех необходимо соблюдать следующие требования:

1. Приемные устройства надо располагать, как можно, дальше от источников магнитных полей.
2. Провода следует располагать перпендикулярно силовым линиям магнитного поля для уменьше-

- ния площади контура, в котором наводится ток. С этой же целью целесообразно применение скрученных (витых) пар проводов или проводников, близко прилегающих друг к другу.
3. Витые пары также следует использовать при передаче токов значительной величины. Действительно, если в двух проводах токи равны, но противоположно направлены, их общее магнитное поле будет нулевым. При этом, ток не должен попадать на линии заземления (в противном случае, могут образоваться паразитные контуры заземления).
 4. Необходимо использовать экран из материала, соответствующего рабочей частоте и величине магнитного поля.
 5. Для борьбы с магнитными помехами можно использовать экранированные провода. В этом случае по экрану допускается протекание обратного тока (рис. 2.26), в результате чего суммарное магнитное поле будет равно нулю. (Отметим, что здесь не действует рассмотренное ранее правило защиты от электростатических наводок). Такой способ экранирования используют при подключении силовых устройств, например, электроприводов.



Рис. 2.26. Соединение датчика с двигателем с помощью коаксиального кабеля для уменьшения магнитных помех

Из всего вышесказанного видно, что бороться с магнитными наводками гораздо сложнее, чем с помехами от электрических полей.

Итак, мы рассмотрели основные элементы и принципы построения информационных устройств для робототехнических и мехатронных систем. Использование соответствующих ЧЭ, измерительных схем и усилителей, а также грамотная организация каналов передачи сигналов позволяет строить эффективные датчики, для систем автоматизации, станков, а также средств измерения и неразрушающего контроля.

3. Понятия о дискретизации и квантовании сигналов

Создание микропроцессора, а затем и персонального компьютера фирмой IBM в 80-х годах 20 века привело к развитию аппаратно-программных средств обработки результатов измерений. В настоящее время промышленно выпускают устройства для сбора данных, подключаемые к шине компьютера или стандартным устройствам ввода-вывода, оснащенные комплексным программным обеспечением для сбора, обработки и отображения получаемой информации. Такие устройства получили названия «интеллектуальных». Наряду с ними стали появляться и «интеллектуальные» датчики, содержащие в своем составе встроенные микропроцессоры, обрабатывающие данные непосредственно в самом датчике. Более того, в программном обеспечении таких датчиков все чаще использует методы и средства искусственного интеллекта.

На первом шаге в любом интеллектуальном датчике выполняется процедура аналого-цифрового преобразования, в соответствии с которой аналоговый сигнал с одного или нескольких ЧЭ дискретизируется по времени и квантуется по амплитуде.

Под *дискретизацией* понимают представление непрерывного аналогового сигнала последовательностью его значений, взятых через определенный промежуток времени — период дискретизации T_d . Дискретизация реализует преобразование изменяющегося во времени сигнала $y(t)$ в решетчатую функцию $y[kT_d]$, где k — целое число. *Функция преобразования* при дискретизации имеет вид

$$y(t) \rightarrow y[kT_d]$$

Частоту дискретизации $f_d = 1/T_d$ выбирают исходя из требования, чтобы обработка и вывод информации проводились в моменты времени между получением ближайших отсчетов данных. Системы, удовлетворяющие этому требованию, получили название *систем реального времени*, т.к. они не требуют накопления измеряемой информации для последующей обработки.

Квантование представляет собой замену текущего значения амплитуды выходного аналогового сигнала $y(t)$ датчика ближайшим по величине фиксированным значением из соответствующего уровня квантования. Уровни квантования делят весь диапазон возможного изменения значения сигнала $y(t)$ на

конечное число интервалов — шагов квантования. Чаще всего при квантовании происходит представление абсолютного значения функции $y(t)$ в данный момент времени t_0 в двоичном виде. Функция преобразования в этом случае описывается зависимостью

$$y_{t_0}(n) \rightarrow 2^n \Delta y,$$

где n — разрядность АЦП; $\Delta y = y_{\min}$ — разрешающая способность АЦП, соответствующая минимальному уровню сигнала.

Эффективным средством обработки информации при измерениях являются микропроцессоры цифровой обработки сигналов, реализующие функции цифровой фильтрации, преобразования Фурье и др.

Рассмотрим процесс дискретизации некоторого сигнала $y(t)$. Для конкретности допустим, что функция $y(t)$ — гармоническая (сплошная линия на рис. 2.27). Очевидно, что чем выше частота дискретизации, тем точнее дискретные значения функции (точки на рис. 2.27) будут соответствовать исходному сигналу. Если f_d мала, по сравнению с частотой сигнала f_c , то восстановленный сигнал будет значительно отличаться от исходного (пунктир на рис. 2.27, б). Для безошибочного восстановления дискретного сигнала необходимо выполнение условия

$$f_d \geq 2f_c.$$

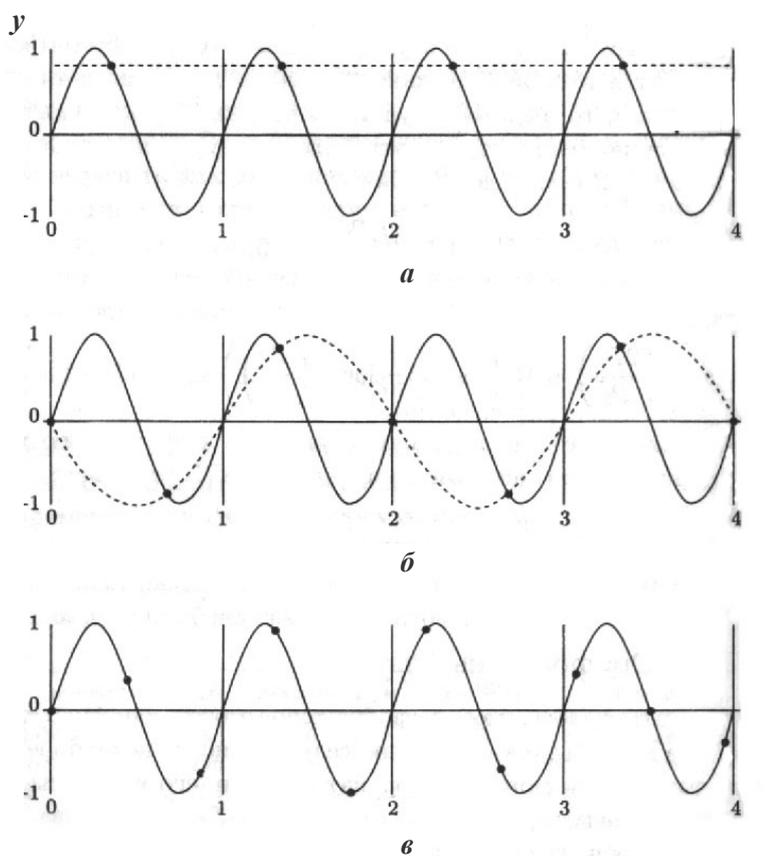


Рис. 2.27. Оцифровка и восстановление аналогового сигнала:
 а — $f_d = f_c$; б — $f_d = \frac{1}{4}f_c$; в — $f_d = \frac{10}{4}f_c = 2,5f_c$.

Это условие доказывается теоремой Котельникова¹, в соответствии с которой аналоговый сигнал с ограниченным спектром частот может быть точно описан дискретной последовательностью значений его амплитуды, если эти значения следуют с частотой минимум вдвое превышающей наивысшую частоту спектра.

Дискретизация аналогового сигнала представляет собой частный случай амплитудно-импульсной модуляции. Особенностью амплитудной модуляции является возникновение дополнительных частот (боковых полос) в спектре амплитудно-модулированного сигнала. В спектре цифрового (импульсного) сигнала появляется спектр высших

¹ Теорема доказана в 1933 г. советским инженером В. А. Котельниковым. В зарубежной литературе она известна и как теорема Шеннона и как теорема Найквиста, которые были сформулированы в 40-х годах 20 века.

гармоник, расположенных вокруг гармоник частоты дискретизации (рис. 2.28). Поэтому в спектре импульсного сигнала вокруг частот, кратных f_d появляются по две зеркальных копии спектра исходного аналогового сигнала. Для устранения одного из зеркальных отражений спектра используют фильтр низких частот с частотой среза, равной половине частоты дискретизации (так называемые «anti-aliasing фильтры»). Кроме того, частоту дискретизации искусственно завышают, так чтобы f_d было заведомо больше $2f_{c_{\max}}$. Высокоточные системы дискретизации используют частоты дискретизации порядка $6f_{c_{\max}}$.

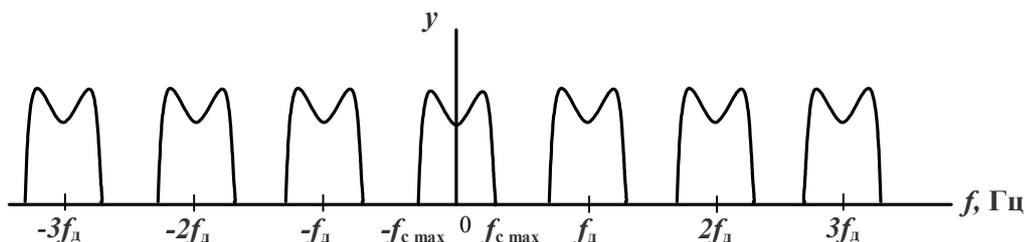


Рис. 2.28. Частотный спектр идеально дискретизированной функции

Теперь рассмотрим процесс квантования сигнала. Наиболее распространено линейное или однородное квантование, когда шаг квантования линейно зависит от амплитуды входного сигнала. Устройство, выполняющее эту процедуру, получило название линейного квантователя. В процессе линейного квантования непрерывный аналоговый сигнал представляется последовательностью прямоугольных импульсов разной амплитуды. Значение амплитуды дискретно и зависит от разрядности n и разрешения Δ_k квантователя, связанных между собой соотношением вида:

$$\Delta_k = \frac{1}{2^n},$$

Расстояние между двумя ближайшими значениями квантованного сигнала получило название шага квантования.

Необходимое значение Δ_k выбирают исходя из требования обеспечения заданного динамического диапазона $\mathcal{L}_{\text{дин}}$ аналогового сигнала, равного отношению максимальной амплитуды сигнала к минимальной. Например, при 16-битном квантовании аналогового сигнала изменяющегося в динамическом диапазоне 120 дБ разрешение составит $1/65\,536$ максимальной амплитуды сигнала или 0,0018 дБ. Кроме того, при подключении квантователя к аналоговому датчику необходимо согласовать уровни входных и выходных сигналов, так чтобы диапазон измеряемых значений (FS) квантователя был равен диапазону выходных значений (FSO) датчика. Если FS квантователя оказывается меньше FSO датчика, то он преобразует не весь сигнал, а обрезает его на уровне, соответствующем значению FS. Этот эффект, называемый «clipping» является результатом перегрузки квантователя и приводит к появлению помех в цифровом сигнале. Однако и при согласованных уровнях сигналов возможно возникновение шумов квантования, вызванных слишком большим разрешением квантователя, что приводит к невозможности восстановления аналоговых сигналов с амплитудой $y < FS \cdot \Delta_k$. Чем выше разрядность квантователя, тем ниже уровень шума квантования. Наибольшее значение уровня шума квантования определяют по формуле:

$$U_{\text{ш}_k \text{ max}} = 20 \lg \left(\frac{1}{2^n} \right).$$

Например, при 16-битном квантовании $U_{\text{ш}_k \text{ max}} = -96$ дБ, а при 20-битном -120 дБ. Тогда учитывая, что 0 дБ — это величина максимального по уровню сигнала, а $U_{\text{ш}_k \text{ max}}$ — уровень шума квантования можно считать, что динамический диапазон квантователя равен $-U_{\text{ш}_k \text{ max}}$ дБ.

Отметим, что при квантовании сигнала, также как и при его дискретизации появляются высокочастотные составляющие, обусловленные наличием ступенек в оцифрованном сигнале. Чем больше ступенек содержит сигнал, т.е. чем меньше разрешение квантователя (и точнее преобразование), тем шире спектр сигнала². Следовательно, увеличение частоты дискретизации и разрядности квантователя ведут к расширению спектра оцифрованного сигнала.

² Этот эффект был обнаружен американским математиком Дж. Гиббсом и получил название в его честь.

Дискретизация сигнала во времени и его линейное квантование по амплитуде называется импульсно-кодовой модуляцией (англ. Pulse Code Modulation, или РСМ). В результате преобразования получается импульсный сигнал ступенчатой формы. Ширина импульса равна периоду дискретизации $1/f_d$, а высота - квантованному значению амплитуды входного сигнала.

4. Аналого-цифровые преобразователи интерфейсных схем

АЦП является важнейшим элементом информационной системы и служит для конвертирования аналогового сигнала с выхода измерительной цепи в эквивалентный цифровой сигнал. Конструктивно АЦП выполняют в виде сборки из дискретных элементов, интегральной схемы или специализированного модуля.

Различают три основных типа АЦП: АЦП двойного интегрирования, АЦП с обратной связью и параллельный. Их некоторые характеристики приведены в табл. 2.12.

Таблица 2.12

Сравнение некоторых типовых схем АЦП

Тип	Период преобразования, T_n	Стоимость	Назначение
Двойного интегрирования	Большой (40 мс)	Низкая	Для типовых вычислений с переменным временем преобразования ($n = 10 - 18$ бит)
С обратной связью	Малый (0,4 – 25 мкс)	Средняя	Для скоростных вычислений ($n = 10$ бит)
Параллельный	Очень малый (25 нс)	Высокая	Для высокоскоростных вычислений ($n = 8 - 12$ бит)

АЦП двойного интегрирования очень популярны, особенно в схемах, где не требуется высокого быстродействия. В частности, их используют в цифровых вольтметрах и мультиметрах. АЦП осуществляет преобразование в два этапа: сначала входной сигнал преобразуется в функцию времени, которую затем с помощью счетчика импульсов конвертируется в цифровой код. Недостатком этого преобразователя является невысокое быстродействие, прямо зависящее от величины входного сигнала.

АЦП с обратной связью выпускают двух типов: АЦП последовательного приближения и следающий АЦП. Конструктивно они представляют собой интегральные схемы, а их быстродействие постоянно и не зависит от входного сигнала. Принцип действия АЦП последовательного приближения основан на сравнении входного сигнала с прецизионным напряжением или током, формируемым схемой АЦП. Для получения на выходе n -битного слова необходимо провести n циклов сравнения. Следающий АЦП конструктивно похож на АЦП последовательного приближения (в его состав также входят ЦАП и компаратор); компаратор отслеживает входной аналоговый сигнал и сигнал обратной связи и в соответствии с этим управляет реверсивным счетчиком.

Параллельный АЦП содержит источник опорного напряжения, цепочку резистивных делителей напряжения и компараторы, сигналы с которых и кодируются в n -битное цифровое слово. Это самый быстрый, но и самый дорогой АЦП из всех выпускаемых: для получения n -битного выходного кода необходимо 2^n компараторов.

Рассмотрим процесс преобразования сигналов в самом популярном АЦП — n -разрядном АЦП с обратной связью. Проведем квантование аналогового сигнала $y(t)$ в момент времени t_0 , т.е. квантование некоторой величины y_{t_0} . Цифровое слово ограничено старшим знаковым разрядом, имеющим наибольшее значение и младшим знаковым разрядом (МЗР), имеющим наименьшее значение. Ошибка квантования Δ_k , ограничивающая разрешающую способность АЦП, составляет

$$\Delta_k = \pm \frac{1}{2} \text{МЗР} .$$

Ошибка квантования представляет собой аддитивную ошибку измерения (или ошибку нуля) одинаковую по величине во всем диапазоне измерения. Так, для 10-битного АЦП, измеряющего аналоговый сигнал в диапазоне 0 ... 10 В, ошибка квантования будет равна $\pm \frac{1}{2} \cdot \frac{10}{1024} = 0,0048$ В.

АЦП выпускают для работы с биполярными и униполярными аналоговыми сигналами. В обоих случаях, амплитуда сигнала на входе АЦП должна быть близка по величине к максимально допустимому для данного АЦП сигналу. При этом для получения ошибки квантования не более 1 МЗР, амплитуда

входного сигнала за время преобразования не должна изменяться более чем, на значение соответствующее $\Delta_k = \pm \frac{1}{2} \text{МЗР}$. Это условие определяет возможные ограничения по быстродействию и точности аналого-цифрового преобразования, т.е. требования к дискретизации и квантованию с помощью конкретного АЦП.

Пусть на вход АЦП поступает сигнал вида

$$y = y_0 \sin \omega t$$

Для определения допустимой скорости $\left(\frac{dy}{dt}\right)$ изменения входного сигнала продифференцируем это выражение. Получим

$$\left(\frac{dy}{dt}\right) = \omega y_0 \cos \omega t$$

Следовательно, максимальное значение скорости равно $\left(\frac{dy}{dt}\right)_{\max} = \omega y_0$. Для конкретности ограничимся рассмотрением двухполярного АЦП, когда $2y_0 = y_{\max}$, и y_{\max} — максимально допустимый для данного АЦП входной сигнал.

В АЦП с обратной связью выходной сигнал (код) изменяется с частотой 1 МЗР за такт. Однако, корректное преобразование возможно в случае, если изменение входного аналогового сигнала за такт не превышает значения $\frac{1}{2} \text{МЗР}$. Следовательно

$$\left(\frac{dy}{dt}\right)_{\text{доп}} = \frac{\frac{1}{2} \text{МЗР}}{T_T},$$

где $\left(\frac{dy}{dt}\right)_{\text{доп}}$ — допустимая скорость нарастания входного сигнала, $T_T = \frac{1}{f_T}$ и f_T — период и частота тактового генератора АЦП, соответственно. При этом

$$1 \text{МЗР} = \frac{y_{\max}}{2^n}.$$

Тогда получим

$$\left(\frac{dy}{dt}\right)_{\text{доп}} = \frac{\frac{1}{2} y_{\max}}{2^n} f_T = \frac{y_{\max}}{2^{n+1}} f_T$$

Приравнивая значения для скоростей, получим

$$\omega y_0 = \frac{2y_0}{2^{n+1}} f_T$$

Тогда максимальное значение частоты входного сигнала АЦП не должно превышать значения

$$\omega_{\max} = \frac{f_T}{2^n} = \frac{1}{2^n T_T}$$

Например, для 10-битного следящего АЦП с $T_T = 1 \text{ мкс}$ имеем $f_{\max} = \frac{\omega_{\max}}{2\pi} \approx 155 \text{ Гц}$. Таким образом, хотя обновление выходного сигнала производится с частотой 1 МГц, т.е. за 1 мкс, частота входного сигнала не должна превышать 155 Гц.

Рассмотрим АЦП последовательного приближения. Процесс преобразование для n -битного АЦП этого типа содержит n тактов, причем входной сигнал за такт не должен изменяться более чем на

$\Delta_k = \pm \frac{1}{2} \text{МЗР}$. Тогда, учитывая, что $\left(\frac{dy}{dt}\right)_{\text{доп}} = \frac{\frac{1}{2} \text{МЗР}}{T_T}$ получим

$$\omega_{\max} = \frac{f_T}{n2^n}$$

Следовательно, для 10-битного АЦП последовательного приближения с $T_T = 1$ мкс $f_{\max} = \frac{\omega_{\max}}{2\pi}$ составит около 15 Гц.

Отметим, что в приведенных расчетах для обеспечения лучшего разрешения АЦП изменение входного сигнала за такт преобразования не превышает $\pm \frac{1}{2}$ МЗР, что существенно ограничивает возможность обработки высокоскоростных сигналов. Для улучшения частотной характеристики схемы преобразования перед АЦП устанавливают так называемое устройство выборки и хранения (УВХ). Целью УВХ является фиксация мгновенного уровня сигнала, и сохранение его в течение такта преобразования. Быстродействие УВХ ограничивается апертурной задержкой T_a , составляющей 0,3 ... 1,0 пс. Тогда скорость изменения входного сигнала можно увеличить до значения

$$\left(\frac{dy}{dt}\right)_{\text{доп}} = \frac{\frac{1}{2} \text{МЗР}}{T_a}$$

Проводя аналогичные вычисления, получим следующее выражение для определения ω_{\max} :

$$\omega_{\max} = \frac{1}{2^n T_a}$$

Таким образом, установив перед 10-битным АЦП схему УВХ и полагая $T_a = 0,3$ пс, получим $f_{\max} = 518$ МГц. В этом случае, максимальная частота входного сигнала будет ограничена только условием теоремы Котельникова (в данном примере 500 кГц). Если время преобразования АЦП обозначить $T_{\text{АЦП}}$, то при наличии УВХ максимально допустимую частоту входного сигнала можно определить из выражения:

$$f_{\max} = \frac{1}{2(T_{\text{АЦП}} + T_a)}$$

5. Цифровые интерфейсы измерительных систем

При классификации цифровых интерфейсов часто используют критерий параллельности или последовательности передачи данных. В параллельных интерфейсах каждый сигнал передается по отдельной физической линии, которые объединяют в шины. Различают три типа шин: шина данных, шина адреса и шина управления. Число линий шины данных обычно соответствует разрядности передаваемого цифрового сигнала, т.е. соответствует разрядности контроллера датчика и его АЦП. С двух сторон шины данных устанавливают ключевые схемы — передатчики и приемники, объединенные в так называемые порты. Каждый передатчик может отключаться от шины данных (путем перевода в высокоимпедансное состояние), давая, тем самым возможность подключения к шине других передатчиков. Приемники транслируют данные на параллельный регистр, запись в который разрешается при наличии соответствующих сигналов на шинах адреса и управления. Структуры шин адреса и управления обычно аналогичны структуре шины данных. Примером параллельного интерфейса является шина ISA, успешно эксплуатируемая еще с 70-х годов прошлого века. Параллельный интерфейс позволяет строить высокоскоростные системы передачи данных. Главными недостатками интерфейса являются его высокая стоимость и ограничение на длину линии связи. Так, длина шлейфа связывающего внешний параллельный порт компьютера (LPT) с портом принтера не превышает 3 м.

Последовательные интерфейсы не имеют шин данных, адреса и управления и вся информация передается по нескольким проводам. Самая простая схема такого интерфейса — однопроводная, состоящая из сигнального и общего проводов. Недостатком однопроводной схемы является низкая пропускная способность канала и сложность синхронизации приемо-передающих устройств. Удвоение пропускной способности достигают в схемах дуплексной или двунаправленной передачи данных.

В параллельно-последовательном цифровом интерфейсе уменьшают количество линий связи путем совмещения шин адреса и данных. Разделение собственно адреса и данных достигают путем их мультиплексирования; при этом, однако, вдвое снижается пропускная способность канала.

Современные цифровые интерфейсы используют два режима синхронизации: асинхронный и син-

хронный. В асинхронном режиме все устройства работают с одинаковой скоростью. Этот режим эффективен, когда все порты имеют близкие значения постоянных времени. Так, например, АЦП, подключенный к интерфейсу в асинхронном режиме, существенно снижает его пропускную способность. Для устранения этого недостатка используют специальные способы коммутации АЦП и собственно интерфейса, например, с помощью так называемых «регистров-защелок».

Синхронный режим требует наличия обратной связи между элементами информационной системы. Для этой цели предназначен специальный сигнал обратной связи (квитирования), который сообщает передатчику об окончании работы приемника. При синхронном режиме достигается самая высокая пропускная способность канала. Однако его применяют обычно в параллельных интерфейсах с относительно короткими (несколько метров) линиями связи.

Линии передачи данных для каждого интерфейса выполняют с использованием проводной и беспроводной технологий. Среди проводных линий наиболее распространены электрические провода и оптическое волокно. Так, для параллельных интерфейсов чаще всего используют неэкранированные электрические провода, что не позволяет обеспечить скоростную передачу данных на значительные расстояния. В последовательных и последовательно-параллельных интерфейсах применяют электрические провода с гальванической развязкой между портами (рис. 2.29) и волоконно-оптические линии передачи данных. Волоконно-оптические линии разделяют на одномодовые и многомодовые. В первых используют световые сигналы только одной длины волны, во вторых – различные сигналы имеют разные длины волн. Многомодовые линии имеют значительно большую пропускную способность, однако существенно дороже и требуют высокого качества оптоволоконна и сопутствующего оборудования.

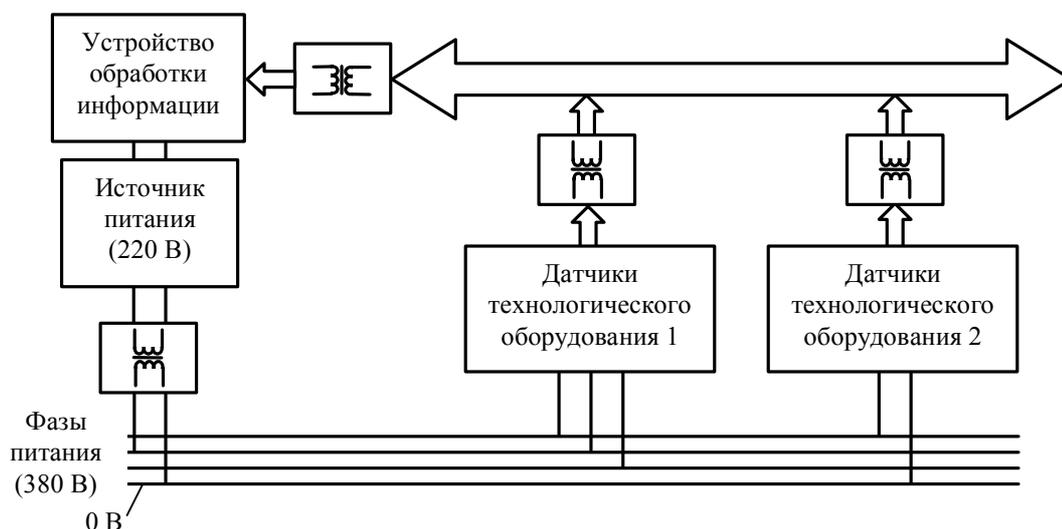


Рис. 2.29. Гальваническая развязка в распределенной системе сбора данных в цеху

В беспроводных линиях передачи данных используют электромагнитное излучение радиочастотного (в том числе, оптического) диапазона. На практике различают радиоволновые и оптические линии передачи данных. Радиоволновые линии используют в последовательных однопроводных интерфейсах. Их дальность действия достигает тысячи и более километров, пропускная способность ограничивается несущей частотой сигнала. В оптических линиях беспроводной передачи данных используют оптронные пары с излучателем в виде светодиода с диаграммой направленности $\sim 10 \dots 50^\circ$ или полупроводникового лазера. Первые применяют при построении интерфейсов малой дальности действия (десятки метров) и относительно небольшой пропускной способности. Дальность действия вторых достигает несколько тысяч километров, а пропускная способность до 10^{12} бит/с. Поскольку световые лучи распространяются строго прямолинейно, дальность действия каналов связи такого рода ограничивается так называемым расстоянием «прямой видимости».

5.1. Цифровые последовательные интерфейсы

Большинство микроконтроллеров, входящих в состав сенсорной системы содержат асинхронный последовательный приемопередатчик UART (англ. *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*). Это устройство, в котором происходит преобразование данных из параллельного формата данных контроллера в последовательный при передаче, и из последовательного в параллельный при приеме, является важным элементом последовательного интерфейса. В UART реализован полнодуплексный режим, при ко-

тором порт приемника RX (вход UART) и порт передатчика TX (выход UART) могут работать одновременно, независимо друг от друга. Уровень сигнала устанавливается относительно общего провода, поэтому минимальное количество проводов при передаче данных равно трем. Передача начинается посылкой стартового бита с нулевым уровнем, затем передаются биты данных, начиная с младшего (низкий уровень – «0», высокий – «1»), а завершается посылкой передачей одного или двух стоп-битов с единичным уровнем. Заметим, что перед началом передачи данных необходимо настроить приемопередатчики на одинаковую скорость.

Исторически наибольшее распространение получили коммуникационные интерфейсы RS232, RS422 и RS485 (англ. - *Recommended Standard 232*), поддерживающие асинхронный и синхронный режимы обмена данными. Интерфейс синхронной и асинхронной передачи данных *RS232C* (стандарт EIA RS232C с рекомендациями V.24 CCITT), построен на униполярных линиях передачи данных и поэтому его дальность действия и пропускная способность невелики (рис. 2.30, а). Максимальная длина линии составляет 15 м, а пропускная способность не превышает $115 \cdot 10^3$ бит/с. Этот интерфейс соединяет два устройства так, что линия передачи первого устройства соединяется с линией приема второго и наоборот (*полный дуплекс*³). В компьютерных устройствах интерфейс реализуется с помощью коммуникационного COM-порта.

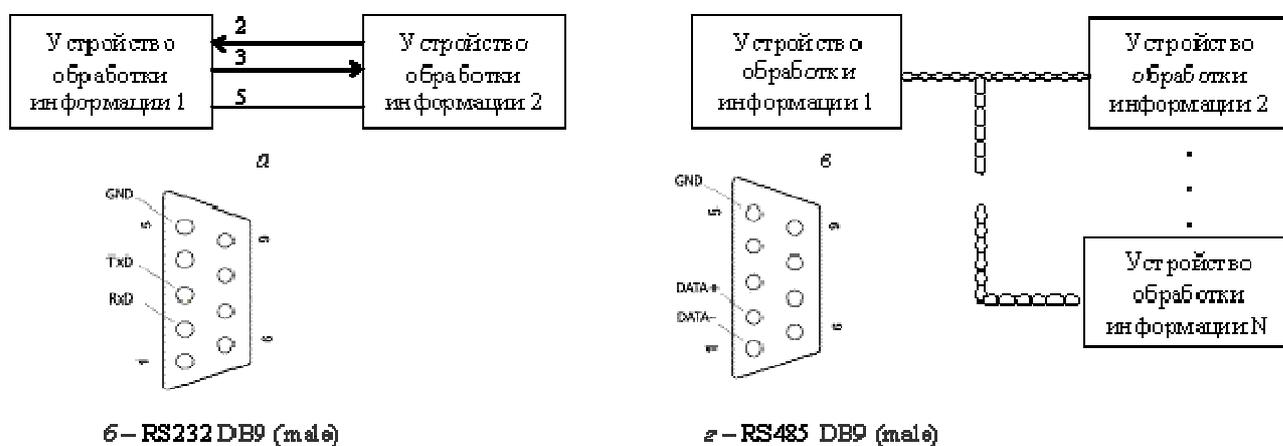


Рис. 2.30. Последовательные интерфейсы и их разъемы а, б – RS232; в, г – RS485 (Advantech)

Более высокую помехозащищенность, а, следовательно, и длину линии (до 1200 м) и пропускную способность (до 10^6 бит/с) обеспечивают интерфейсы RS422 и RS485 (стандарт EIA), реализованные на дифференциальных линиях передачи данных. Интерфейс позволяет подключать до 32 внешних устройств, а при использовании повторителей можно добавить еще 32 узла или увеличить расстояние передачи еще на 1200 м. В интерфейсе RS485 поддерживается *двухнаправленная полудуплексная связь*⁴, причем для передачи и приема данных достаточно одной скрученной пары проводников (рис. 2.30, б). Интерфейс RS422 является упрощенной версией интерфейса RS485.

Один из популярных последовательных интерфейсов — *однопроводной интерфейс CAN* (Control Area Network) был разработан фирмой Bosch в 1987 г. для бортовых систем автомобилей (рис. 2.31). В настоящее время применяется для объединения в сеть «интеллектуальных» устройств ввода/вывода, датчиков, мехатронных модулей и даже целого предприятия. В интерфейсе CAN, также как и в RS485 поддерживается полудуплексная связь и используется дифференциальная линия передачи данных. Высокая помехоустойчивость обеспечивает достижение пропускной способности до 10^6 бит/с, а длина линии передачи данных до 1000 м. Возможно одновременное подключение около сотни внешних устройств.

³ Режим, передачи данных позволяющий одновременно принимать и передавать данные по двум направлениям.

⁴ Режим передачи данных, при котором в каждый момент времени передача идет в одном направлении.

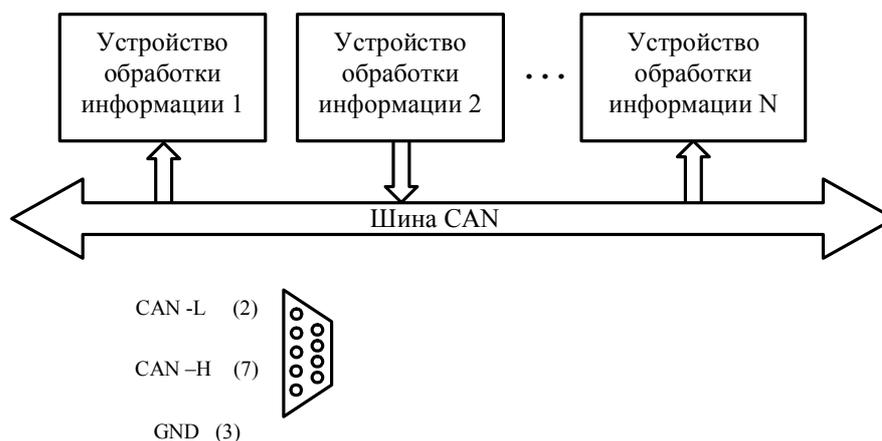


Рис. 2.31. Интерфейс CAN

Последовательный интерфейс USB (англ. *Universal Serial Bus*) — универсальная последовательная шина был разработан в 1996 г. Особенностью этого интерфейса является возможность одновременного оперативного подключения (в так называемом режиме Plug&Play) к главному устройству (управляющему компьютеру) большого количества внешних устройств с помощью четырехпроводных кабелей. USB-кабель представляет собой две «витые пары»: по одной осуществляется передача данных в каждом направлении, а другая используется для питания периферийного устройства напряжением 5 В и током до 500 мА. USB позволяет подключать слаботочные устройства без собственного блока питания. Пропускная способность интерфейса достигает $60 \cdot 10^6$ бит/с, длина линии передачи данных — 5 м.

В ряде случаев при передаче сигналов требуется очень высокая пропускная способность, что характерно, например, для работы с видеоинформацией в реальном масштабе времени. Именно из-за ограничений имеющихся шин в последние годы 20 века стал широко внедряться в компьютерную технику интерфейс IEEE-1394 (FiWi — FireWire — «огненный провод» или i.LINK), разработанный фирмой Apple Computers. Также как и интерфейс USB, IEEE-1394 позволяет оперативно подключать до 63 внешних устройства, обеспечивать пропускную способность до $800 \cdot 10^6$ бит/с, однако длина линии передачи данных не превышает нескольких метров. Интерфейс использует дифференциальную линию передачи данных (сигналы передаются по двум витым парам, обеспечивая полудуплексную связь).

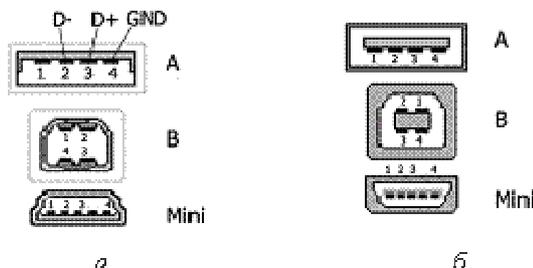


Рис. 2.31. Разъемы USB-A, USB-B и USB-mini; а - male, б - female

Среди беспроводных последовательных интерфейсов различают широко распространенный интерфейс Wi-Fi, а также интерфейсы IrDA и Bluetooth.

Интерфейс Wi-Fi (от англ. *Wireless Fidelity* — «беспроводная точность») представляет собой стандарт на оборудование, установленное в беспроводной локальной сети (Wireless LAN), содержащей так называемые Wireless Access Point — «беспроводные точки доступа». Этот интерфейс используется в мобильных устройствах (карманных персональных компьютерах — КПК, «интеллектуальных телефонах» — смартфонах и др.). Скоростной стандарт IEEE 802.11g, утверждённый в 2002 г. предусматривает работу в диапазоне частот 2,4 ГГц, обеспечивая при этом пропускную способность до $54 \cdot 10^6$ бит/с. Дальность передачи данных достигает несколько сотен метров.

Беспроводной (wireless) интерфейс IrDA (англ. *Infrared Data Association*) является одним из самых простых последовательных интерфейсов, предназначенных для передачи данных на небольшие расстояния (до нескольких десятков метров) с помощью инфракрасного луча. Он основан на архитектуре коммуникационного COM-порта персонального компьютера и обладает пропускной способностью до $115 \cdot 10^3$ бит/с. Также как и в интерфейсе RS485, в IrDA поддерживается двунаправленная полудуплексная связь. В настоящее время большинство пультов дистанционного управления используют этот интер-

фейс. Модификация этого интерфейса, называемая IrDa FIR (Infrared Data Association Fast Infra Red — инфракрасный порт с быстрым типом доступа) обеспечивает пропускную способность до $4 \cdot 10^6$ бит/с.

Еще одним вариантом беспроводного последовательного интерфейса является интерфейс, построенный по технологии *Bluetooth* для систем сотовой телефонии работающий в диапазоне частот 2,4 ГГц⁵. В отличие от интерфейса IrDA эти интерфейсы используют не оптический, а радиоволновой канал передачи данных. Пропускная способность линий составляет более $5 \cdot 10^5$ бит/с, дальность — до 50 м (при работе вне помещений).

При разработке бортовых систем на основе микроконтроллеров большое распространение получили специализированные последовательные интерфейсы CAN, SPI и I2C.

Один из популярных последовательных интерфейсов — однопроводной интерфейс *CAN* (англ. *Control Area Network*) был разработан фирмой Bosch в 1987 г. для бортовых систем автомобилей (рис. 2.32). В настоящее время применяется для объединения в сеть «интеллектуальных» устройств ввода/вывода, датчиков, мехатронных модулей и даже целого предприятия. В интерфейсе CAN, также как и в RS485 поддерживается полудуплексная связь и используется дифференциальная линия передачи данных. Высокая помехоустойчивость обеспечивает достижение пропускной способности до 10^6 бит/с, а длина линии передачи данных до 1000 м. Возможно одновременное подключение около сотни внешних устройств.

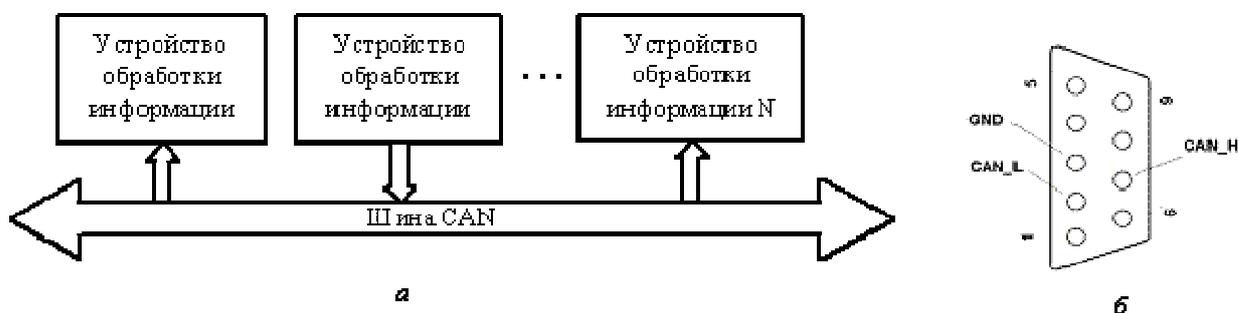


Рис. 2.32. Интерфейс (а) и разъем (б) CAN

SPI (англ. *Serial Peripheral Interface*) представляет собой полнодуплексный скоростной синхронный четырёхпроводной интерфейс. В настоящее время его поддерживают не только AVR-контроллеры, но и контроллеры, разработанные фирмами Microchip и Motorola, и он становится уже промышленным стандартом. Интерфейс SPI предназначен для организации обмена данными между двумя устройствами, одно из которых является инициатором обмена — активным устройством (master), второе — пассивным (slave). Каждое из этих устройств содержит восьмиразрядные регистры сдвига, причем выход регистра активного устройства подключается к входу регистра пассивного и наоборот. Импульсы сдвига генерируются активным устройством. Обмен данными между устройствами происходит за 8 тактовых импульсов. SPI в реализации Atmel имеет четыре задаваемые программно скорости обмена данными, может передавать байты от старшего к младшему биту и наоборот, а также обнаруживает ошибки пакета.

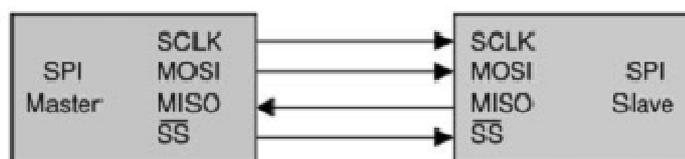


Рис. 2.32. Структура интерфейса SPI

Обозначено: SCLK (Serial CLock) — последовательный тактовый сигнал. Используется для передачи тактового сигнала для пассивных устройств. MOSI (Master Out Slave In) — выход активного, вход пассивного. Служит для передачи данных от активного устройства к пассивному. MISO (Master In Slave Out) — вход активного, выход пассивного. Служит для передачи данных от пассивного устройства к активному. SS (Slave Select) — выбор пассивного.

Другое простое решение, предназначенное для реализации обмена данными между центральным микроконтроллером и отдельными узлами (портами ввода-вывода, памятью, датчиками и т.д.) связано с использованием двунаправленной двухпроводной шины I2C. (Аббревиатура произошла от слов Inter-

⁵ Интерфейс получил название в честь датского короля викингов Гарольда Блутуса, вошедшего в историю как собирателя земель скандинавских.

Integrated Circuit, сокращенно — InterIC, или IC или I2C). Все I2C-совместимые устройства имеют встроенный интерфейс, который позволяет им связываться друг с другом по шине I2C. Это существенно упрощает сопряжение различных устройств, входящих в состав цифровой системы управления и обеспечивает пропускную способность до $1 \cdot 10^6$ бит/с.

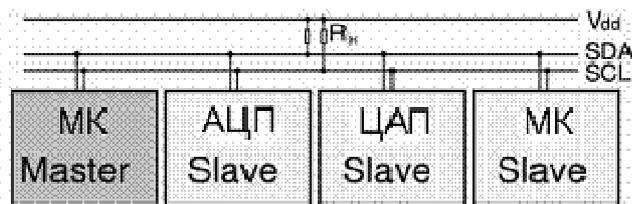


Рис. 2.33. Пример использования интерфейса I²C

На рис. 2.33 приведен пример подключения трех подчиненных устройств (АЦП, ЦАП и микроконтроллера) к одному активному устройству. R_n — нагрузочные резисторы (схема с открытым коллектором). Обозначено: SDA (Serial DATA) — последовательная линия данных, SCL (Serial CLock) — последовательная линия тактирования.

5.2. Цифровые параллельные интерфейсы

Цифровые параллельные интерфейсы в информационных системах роботов используются редко. Их применение обосновано в управляющих устройствах роботов, которые, как правило, создают на основе персональных компьютеров. Наиболее известный параллельный интерфейс ISA (Industry Standard Architecture — промышленный стандарт шинной архитектуры) был разработан фирмой IBM в 1970 г. для специализированных вычислительных систем. С появлением первых персональных компьютеров на базе этого интерфейса стали разрабатывать материнские платы, и в 80-х годах 20 века он стал очень популярен. Однако со временем его невысокая пропускная способность (не более $8 \cdot 10^6$ Байт/с) и 16-ти разрядная шина данных стали препятствием на пути создания высокоскоростных систем обработки данных. В 90-х годах на смену интерфейс ISA пришел параллельный интерфейс PCI (Peripheral Component Interconnect — интерфейс периферийных устройств) обеспечивающий пропускную способность до $266 \cdot 10^6$ Байт/с. Интерфейс PCI, в отличие от ISA работает в синхронном режиме. Модификация этого интерфейса PCI Express использует длину кабеля до 10 м.

Еще один параллельный интерфейс — SCSI (Small Computer System Interface — интерфейс малых компьютерных систем) начал создаваться еще в 70-е годы 20 века. В настоящее время создано уже седьмое поколение этого интерфейса (Ultra320 SCSI). Интерфейс SCSI нашел применение в системах хранения больших массивов данных. Он позволяет подключать до 126 SCSI-устройств и обеспечивает пропускную способность более $250 \cdot 10^6$ Байт/с. Длина кабеля не должна превышать 2 м.