

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СХЕМЫ ДАТЧИКОВ

1. Потенциальное включение и токовая схема

Как правило, датчик является промежуточным звеном между источником напряжения или тока и соответствующей интерфейсной схемой (нагрузкой). Поэтому его характеризуют входным и выходным *импедансом* Z . (Для резистивных ЧЭ $Z = R$, для электромагнитных $Z = \omega L$, для емкостных $Z = 1/\omega C$). На эквивалентных электрических схемах (рис 2.12 *а, б*), сопротивление, соответствующее выходному импедансу датчика подключают параллельно сопротивлению, соответствующему входному импедансу схемы (потенциальное включение) или последовательно с ним (токовое включение). Величина искажений сигнала зависит от импедансов источника питания, датчика и схемы. Для уменьшения искажений сигнала датчик с токовым выходом должен обладать максимально большим выходным импедансом, а интерфейсная схема – минимальным. При использовании потенциального соединения – наоборот, датчик должен иметь низкий импеданс, а схема – высокий.

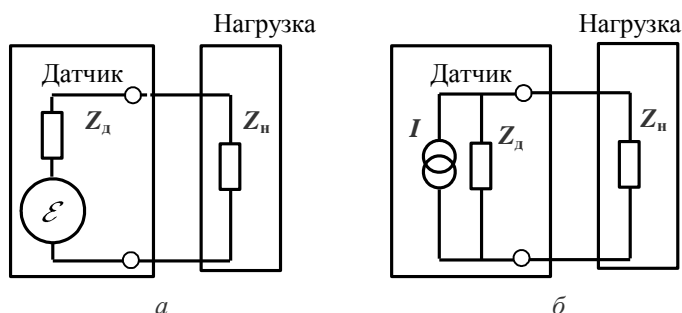


Рис. 2.12. Схемы соединения датчика с блоком питания и интерфейсной схемой:
а – выходной сигнал имеет форму напряжения, *б* – выходной сигнал имеет форму тока.

Простейший датчик содержит единственный ЧЭ, в сложных датчиках их могут быть десятки. В общем случае, вариации выходного импеданса Z_d ЧЭ, связанные с изменениями измеряемой величины x , могут быть преобразованы в электрический сигнал путем включения ЧЭ в измерительную схему, питаемую от источника ЭДС \mathcal{E} или тока I . В робототехнике чаще используют схемы с источниками ЭДС (рис. 2.12, *а*).

Измерительные схемы, или схемы формирования сигналов, предназначены для преобразования информации, полученной ЧЭ в процессе измерения, в параметры электрического сигнала (в форме вариации амплитуды, фазы или частоты).

Наиболее распространены два типа измерительных схем датчиков: параметрические и генераторные. В первом случае функция преобразования измерительной схемы описывается выражением вида

$$U_{\text{ВЫХ}}(x) = \mathcal{E}F(Z_d, Z_c),$$

во втором —

$$\omega_{\text{ВЫХ}}(x) = G(Z_d, Z_c).$$

Здесь Z_c — собственный импеданс измерительной схемы; $\omega_{\text{ВЫХ}}$ — частота выходного сигнала.

Потенциометрическую схему в измерительных цепях датчиков используют наиболее часто. В этой схеме ЧЭ включают последовательно с дополнительным элементом, образуя делитель напряжения. Основное достоинство потенциометрической схемы — ее простота, основной недостаток — чувствительность к внешним помехам. В мостовой схеме, являющейся модификацией потенциометрической и содержащей два дифференциально включенных делителя, удастся существенно снизить влияние внешних факторов.

Чувствительность датчика S_d в параметрических схемах определяется выражением

$$S_d = \Delta U_{\text{ВЫХ}} / \Delta x = (\Delta U_{\text{ВЫХ}} / \Delta Z_d)(\Delta Z_d / \Delta x) = S_c S_{\text{ЧЭ}},$$

где $\Delta U_{\text{ВЫХ}} / \Delta Z_d = S_c$ — чувствительность измерительной схемы; $\Delta Z_d / \Delta x = S_{\text{ЧЭ}}$ — чувствительность ЧЭ.

В *генераторной схеме* вариации импеданса ЧЭ вызывают изменение частоты генерации выходного сигнала, который в этом случае является частотно-модулированным. Такая схема обеспечивает хоро-

шую защиту от помех, особенно при использовании длинных линий связи. Чувствительность генераторной схемы $S_c = \Delta\omega_{\text{вых}}/\Delta Z_d$. Следовательно,

$$S_d = \Delta\omega_{\text{вых}}/\Delta x = S_c S_{\text{чз}}.$$

Функция преобразования датчика будет линейна, если чувствительность измерительной схемы S_c не зависит от x .

2. Источники питания

Проведем анализ основных типов источников питания, используемых в современных системах управления. За последние годы, в этой области, достигнут значительный прогресс¹. Хотя сегодня все еще широко применяют электрохимические источники питания, такие как щелочные (щелочные), С-Zn, Ni-Cd и свинцово-кислотные батареи, их недостатки, связанные со сравнительно малым сроком службы потребовали поиска новых решений. Наибольшее распространение получили Zn-воздушные (их применяют, например, в электронных часах и слуховых аппаратах), Ni-металлогидридные и особенно литиевые источники питания, обладающие не только значительно большим сроком службы, но и достаточно высокими значениями ЭДС. Лидером на рынке являются Li-MnO₂ (ионно-литиевые) гальванические батареи.

Основной характеристикой источника питания является его удельная энергоемкость $\frac{W_{\text{ин}}}{m_{\text{ин}}}$, числен-

но равная энергии на единицу массы или энергии на единицу объема (для миниатюрных устройств). При этом количество энергии, выделяемое батареей, определяется ее конструкцией, размерами и режимом потребления тока. Более того, с ростом тока это количество уменьшается. Производители обычно указывают емкость элемента питания в ампер-часах, показывающих, за какое время при определенной нагрузке батарея разрядится до заданного уровня напряжения. Так, если $C_{\text{Ач}}$ — емкость батареи (А·час), $I_{\text{ср}}$ — средний потребляемый ток, а n — рабочий цикл, то время разряда батареи (срок службы) можно определить из выражения:

$$t = \frac{C_{\text{Ач}}}{I_{\text{ср}} n}$$

Например, если $C_{\text{Ач}} = 250$ мА·час, $I = 5$ мА, а схема в каждом часу работает только 10 мин (ее рабочий цикл равен 1/6), источник питания будет работать 300 час.

Другой важной характеристикой источника питания является его внутреннее сопротивление, в значительной степени определяющее длительность работы. Чем меньше внутреннее сопротивление источника питания, тем больший пиковый ток, а значит и большую пиковую мощность способен он отдать в нагрузку. Как правило, оно составляет 50 ... 500 мОм.

Заметим, что указанные производителем цифры нельзя использовать для точных расчетов. На практике срок службы конкретных источников питания необходимо определять экспериментально, учитывая все рабочие режимы и возможные температурные диапазоны. Если при работе схемы возникают кратковременные импульсные режимы потребления тока, то параллельно источнику питания устанавливают электролитический конденсатор, служащий для накопления энергии.

Все гальванические источники питания разделяют на две группы: источники одноразового использования (батареи) и источники многократного использования (аккумуляторы). Ниже приведены наиболее распространенные типоразмеры батарей:

Название по ГОСТ	Название МЭК*	Американское название	Обиходное название
286	R03	AAA	«мизинчик»
316	R6	AA	«пальчик»
343	R14	C	-
373	R20	D	«большая»
3336	3R12	Н.д.	«плоская»

¹ Первый гальванический источник питания – «Вольтов столб» был создан итальянским физиком А. Вольта в 1800 г.

*Международная электротехническая комиссия

Источник питания *одноразового использования*, как правило, состоит из толстых плоских или концентрических электродов, находящихся в водном растворе электролита. Иногда в малогабаритных батареях для увеличения удельной мощности $\frac{P_{\text{ип}}}{m_{\text{ип}}}$ тонкие длинные электроды наматываются в виде цилиндра и помещаются в металлический контейнер.

До сих пор весьма популярны батареи из C-Zn², в которых анод изготавливают из цинка. В качестве катода используют диоксид марганца, а в качестве электролита - хлорид аммония или цинка. C-Zn батареи предпочтительнее использовать в схемах, где требуется обеспечить высокую удельную мощность, при относительно невысоком сроке службы и низкой стоимости.

В последнее время все чаще применяют щелочные марганцевые источники питания. Батареи этого типа вырабатывают значительный ток и имеют длительный (не менее 5 лет) срок службы.

Самым большим сроком службы (до 10 лет в составе кардиостимуляторов) обладают литиевые источники питания, характеризующиеся также очень высокой удельной мощностью. Однако рабочий ток литиевых батарей, как правило, не превышает нескольких мкА. Литиевые батареи являются экологически чистыми, но огнеопасны.

Источники питания *многократного использования* (аккумуляторы) являются перезаряжаемыми батареями. Активные вещества аккумулятора содержатся в положительном и отрицательном электродах (пластинах) и электролите. Совокупность активных веществ получила название электрохимической системы. Сравнительная характеристика некоторых электрохимических систем приведена в табл. 2.8.

Таблица 2.8

Электрохимические системы аккумуляторов

Тип	Положительный электрод	Отрицательный электрод	Электролит	ЭДС, В
Свинцово-кислотный (SLA)	PbO ₂	Pb	H ₂ SO ₄	2,1
Серебряно-цинковый	AgO	Zn	KOH	1,65
Никель-цинковый	Ni(OH) ₂	Zn	KOH	1,65
Никель-кадмиевый (Ni-Cd)	NiOOH	Cd	KOH+LiOH	1,45
Никель-металлогидридный	NiO	NiLiOH	KOH	1,3
Ионно-литиевый (Li-Ion)	LiMn ₂ O ₄	Li	KOH	3,6
Литиевый (Li-Pol)	Н.д.	Li	Полисульфон	3,6

Наиболее известны герметичные свинцово-кислотные батареи³ обладающие большой емкостью (свыше 15000 А·час) и долговечностью более 10 лет. Они выдерживают до 200 циклов перезарядки при временах разряда не менее 1 часа. Главными достоинствами таких аккумуляторов являются низкая стоимость, малый саморазряд, высокая надежность при работе в экстремальных режимах. К их недостаткам можно отнести сравнительно большие размеры и вес.

Щелочные аккумуляторы обладают высокой мощностью при низкой стоимости. Их недостатком является малый срок службы.

Герметичные Ni-Cd⁴ и Ni-MH (никель — металлогидридные) батареи являются самыми распространенными аккумуляторами. В частности, их применяют в системах мобильной телефонии. Емкость бытового аккумулятора типа AA благодаря использованию пористого никелевого материала превышает 1500 мА час. Ni-Cd источники питания можно многократно заряжать и разряжать. В отличие от других аккумуляторов процесс зарядки NiCd батарей проходит с поглощением тепла, т.е. является эндотермическим. Неполный разряд Ni-Cd и Ni-MH аккумуляторов не влияет на их способность к пол-

² Гальванический элемент этого типа был предложен в 1865 г. французским химиком Ж. Лекланше.

³ Первый работоспособный свинцово-кислотный аккумулятор был изготовлен в 1859 г. французским исследователем Г. Планте. В России первый аккумулятор этого типа создали в Кронштадте в 1881 г.

⁴ Никель-кадмиевый аккумулятор был запатентован в 1899 г. шведом В. Янгером, однако промышленное производство началось только в конце 40-х годов прошлого века.

ной перезарядке. В отличие от Ni-Cd источников питания Ni-MH аккумуляторы экологически безопасные, кроме того, они обладают большей емкостью и меньшим саморазрядом.

Самыми эффективными и дорогими источниками питания многократного использования являются литиевые аккумуляторы, у которых ЭДС одного элемента достигает 3,6 В⁵. Аккумуляторы этого типа обладают лучшим значением удельной энергоемкости и они медленно теряют заряд при отсутствии электрической нагрузки. Разработаны ионные (Li-Ion), серные (Li-S) и полимерные (Li-Pol) литиевые аккумуляторы. Последние используют твердый электролит, что позволяет выполнять их любой формы и размеров.

3. Параметрические схемы датчиков

В *параметрических схемах* осуществляется преобразование импеданса ЧЭ или группы ЧЭ в электрический сигнал в форме напряжения или тока. Схема может состоять исключительно из ЧЭ или включать наряду с ними дополнительные элементы, корректирующие ее функцию преобразования. Наибольшее применение нашли потенциметрические и мостовые измерительные схемы.

Рассмотрим потенциметрическую схему с резистивными элементами. Пусть ЧЭ, сопротивление которого R_d , включен последовательно с резистором постоянного сопротивления R_1 , а питание осуществляется от источника ЭДС \mathcal{E} с внутренним сопротивлением R (рис. 2.13, а). Выходное напряжение схемы $U_{\text{ВЫХ}}$, измеряемое прибором с собственным сопротивлением R_H (измерительный усилитель, вольтметр), равно

$$U_{\text{ВЫХ}} = \mathcal{E} \frac{R_d R_H}{R_d (R + R_1) + R_H (R + R_1 + R_d)}.$$

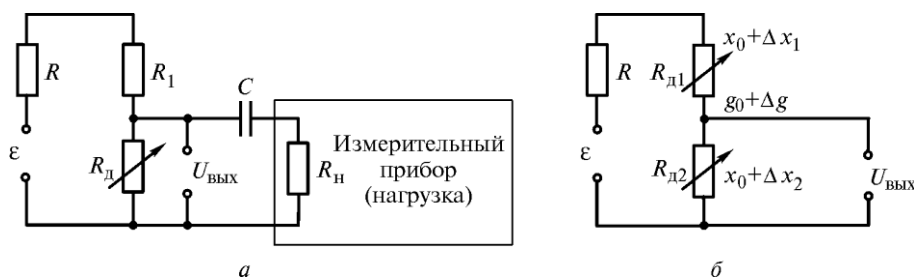


Рис. 2.13. К расчету функции преобразования потенциметрической схемы (а) и потенциметрическая схема с дифференциальным включением ЧЭ (б)

Общепринятым требованием при построении измерительных схем является условие $R_H \gg R_d$. При этом напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ не зависит от нагрузки и является нелинейной функцией от R_d :

$$U_{\text{ВЫХ}} = \mathcal{E} \frac{R_d}{R + R_1 + R_d}.$$

Данное выражение представляет собой *функцию преобразования* потенциметрической схемы. В большинстве случаев требуется, чтобы вариации напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ были пропорциональны вариациям сопротивления R_d ЧЭ. Линеаризация функции преобразования достигается двумя основными способами: работой в линейной зоне характеристики и дифференциальным включением ЧЭ.

Работа в линейной зоне предполагает, что сопротивление ЧЭ меняется от R_{d0} до $(R_{d0} + \Delta R_d)$, вызывая изменение выходного напряжения от $U_{\text{ВЫХ}0}$ до $(U_{\text{ВЫХ}0} + \Delta U_{\text{ВЫХ}})$. Опуская промежуточные выкладки, запишем

$$U_{\text{ВЫХ}0} + \Delta U_{\text{ВЫХ}} = \mathcal{E} \frac{R_{d0} + \Delta R_d}{(R_{d0} + R_1 + R)[1 + \Delta R_d / (R_{d0} + R_1 + R)]}.$$

⁵ В 1912 году англичанином Г. Льюисом были осуществлены первые работы по созданию литиевых аккумуляторов.

При $\Delta R_d \ll R_{d0} + R_1 + R_c$ с точностью до величин второго порядка малости имеем

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = \mathcal{E} \frac{(R + R_1)\Delta R_d}{(R_{d0} + R_1 + R)^2}.$$

Чувствительность измерительной схемы $S_c = \Delta U_{\text{ВЫХ}} / \Delta R_d$ максимальна, если $R + R_1 = R_{d0}$, в этом случае функция преобразования будет равна

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = \mathcal{E} \Delta R_d / 4R_{d0}.$$

Дифференциальное включение образуется при замене постоянного сопротивления R_1 вторым ЧЭ, идентичным используемому, но с отрицательным знаком перед ΔR_d , т. е. $R_1 = R_{d0} - \Delta R_d$. Тогда при включении этих ЧЭ навстречу один другому получим так называемую двухтактную схему. Это могут быть, например, два одинаковых тензорезистора, подвергающихся равным по величине, но противоположным по знаку деформациям. Тогда

$$U_{\text{ВЫХ}0} + \Delta U_{\text{ВЫХ}} = \mathcal{E} \frac{R_{d0} + \Delta R_d}{R_{d0} + \Delta R_d + R + R_{d0} - \Delta R_d},$$

откуда функция преобразования

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = \mathcal{E} \frac{\Delta R_d}{2R_{d0} + R}.$$

Дифференциальное включение ЧЭ позволяет скомпенсировать влияние посторонних факторов, ухудшающих точность датчика. Рассмотрим потенциметрическую схему с двумя ЧЭ сопротивлениями R_{d1} и R_{d2} , вариации которых вызывают соответствующие приращения $\Delta U_{\text{ВЫХ}1}$ и $\Delta U_{\text{ВЫХ}2}$ измеряемой величины (рис. 2.13, б). Пусть влияющий фактор g имеет одинаковое для двух ЧЭ приращение Δg . До воздействия измеряемой величины имеем

$$x_1 = x_2, g = g_0, R_{d1} = R_{d2} = R_{d0}, U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ}0} = \mathcal{E}/2,$$

после воздействия

$$R_{d1} = R_{d0} + \Delta R_{d1}, R_{d2} = R_{d0} + \Delta R_{d2},$$

где $\Delta R_{d1} = S_g \Delta g + S \Delta x_1$; $\Delta R_{d2} = S_g \Delta g + S \Delta x_2$; $S_g = \Delta R_d / \Delta g$, $S_{\text{ЧЭ}} = \Delta R_d / \Delta x$ — чувствительность каждого ЧЭ к влияющему фактору и к измеряемой величине соответственно.

Выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}(x) = U_{\text{ВЫХ}0} + \Delta U_{\text{ВЫХ}}$. Полагая $R \ll R_{d0}$ получаем

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = \mathcal{E} \frac{\Delta R_{d2} - \Delta R_{d1}}{4R_{d0}[1 + (\Delta R_{d1} + \Delta R_{d2})/(2R_{d0})]}.$$

Если на ЧЭ, имеющий сопротивление R_{d1} , измеряемая величина не воздействует ($\Delta x_1 = 0$), то

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}}(x) = \mathcal{E} \frac{S_{\text{ЧЭ}} \Delta x_2}{(4R_{d0})/(1 + S_g \Delta g / R_{d0})}$$

при условии, что $S_{\text{ЧЭ}} \Delta x_2 \ll R_{d0}$

При совместных измерениях, когда $\Delta x = \Delta x_2 = -\Delta x_1$, имеем

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}}(x) = \mathcal{E} \frac{S_{\text{ЧЭ}} \Delta x}{2R_{d0}(1 + S_g \Delta g / R_{d0})}.$$

Следовательно, при дифференциальном включении влияющие факторы в функции преобразования представлены намного слабее, чем измеряемая величина.

Недостатком потенциметрической схемы является наличие в выходном сигнале постоянной составляющей, не содержащей полезной информации. Для выделения полезной $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$ составляющей сигнала можно использовать емкостную связь между схемой и нагрузкой (см. рис. 2.13, а). В этом случае кон-

денсатор C и внутреннее сопротивление R_H образуют фильтр верхних частот. Для устранения постоянной составляющей также используют потенциометрическую схему с симметричным питанием или мостовую схему.

Мостовая схема представляет собой двойной потенциометр с дифференциальным включением. Ее основное преимущество заключается в большей точности и меньшей чувствительности к влияющим факторам, чем у потенциометрической схемы.

В зависимости от типа ЧЭ мостовые схемы получили названия по фамилиям их создателей: мост Уитстона (рис. 2.14, *а*), мост Саути (рис. 2.14, *б*), мост Вина (рис. 2.14, *в*), мост Максвелла и др. Наиболее известна мостовая схема Уитстона. Во всех схемах нагрузка R_H включена в диагональ моста. Мост находится в равновесии, когда напряжения $U_a = U_b$, т. е. $I_{ab} = 0$ (см. рис. 2.14, *а*). Для этого необходимо выполнение равенства $R_1 R_4 = R_2 R_3$.

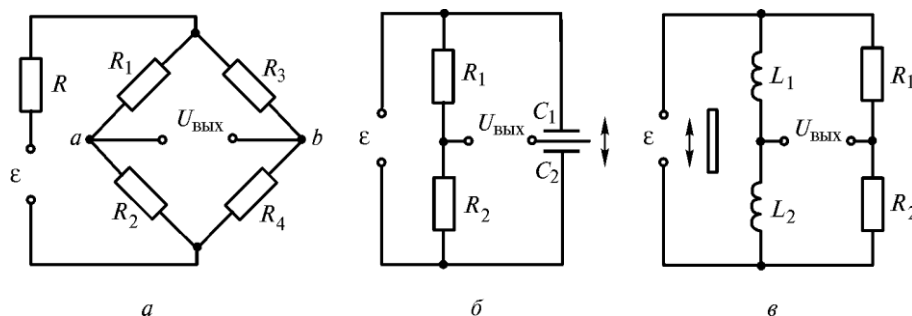


Рис. 2.14. Мостовые схемы: *а* — резистивная; *б*, *в* — комбинированные

Условие равновесия зависит от сопротивлений плеч моста и не зависит от внутреннего сопротивления источника питания R и сопротивления нагрузки R_H . Обычно внутреннее сопротивление источника мало ($R \ll R_1, R_2, R_3, R_4, R_H$). В идеальном случае ($R = 0$) выражение для тока I_{ab} имеет вид

$$I_{ab} = \mathcal{E} \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{R_1 R_4 (R_2 + R_3) + R_2 R_3 (R_1 + R_4) + R_H (R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}.$$

Если нагрузка (осциллограф, вольтметр или усилитель) имеет большое входное сопротивление ($R_H \gg R_1, R_2, R_3, R_4$), то

$$I_{ab} = \mathcal{E} \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{R_H (R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}; \quad U_{\text{ВЫХ}} = R_H I_{ab} = \mathcal{E} \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}.$$

Зависимость $U_{\text{ВЫХ}} = f(R)$ описывает функцию преобразования мостовой схемы Уитстона. Чувствительность моста S_C максимальна в положении равновесия, когда $R_1 = R_2$ и $R_3 = R_4$. Для упрощения процедуры измерений часто выбирают сопротивления плеч моста одинаковыми: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0$. В общем случае мост может иметь одно, два или четыре рабочих плеча. Для схемы с четырьмя рабочими плечами (т. е. в каждое плечо включен ЧЭ) имеем

$$R_1 = R_0 + \Delta R_1; \quad R_2 = R_0 + \Delta R_2; \quad R_3 = R_0 + \Delta R_3; \quad R_4 = R_0 + \Delta R_4.$$

Тогда напряжение разбаланса будет определяться подстановкой значений R_1, R_2, R_3, R_4 в выражение для функции преобразования. Существенно, что это напряжение является нелинейной функцией вызвавших его вариаций сопротивлений плеч моста. Так, если в схеме используется только один ЧЭ, например R_2 , то

$$U_{\text{ВЫХ}} = \mathcal{E} \frac{\Delta R_2}{4R_0[1 + \Delta R_2 / (2R_0)]}.$$

Улучшение функции преобразования мостовой схемы заключается в линеаризации характеристики и компенсации влияющих факторов. Как и в потенциометрических схемах, наиболее известны два способа: работа на линейном участке характеристики и дифференциальное включение ЧЭ. В первом случае

мост из четырех одинаковых ЧЭ с сопротивлениями $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0$, изменения которых ΔR_i малы ($\Delta R_i \ll R_0, i = 1, 2, 3, 4$) с точностью до величины второго порядка малости, линеен вблизи положения равновесия:

$$U_{\text{вых}} = \mathcal{E} \frac{(\Delta R_2 - \Delta R_1 + \Delta R_3 - \Delta R_4)}{4R_0}.$$

Это соотношение отражает очень важное свойство моста, у которого все плечи в положении равновесия одинаковы — идентичные изменения сопротивлений в двух смежных плечах не приводят к разбалансу моста. Данное свойство позволяет компенсировать воздействия влияющих факторов, в том числе температурных изменений.

При дифференциальном включении плечи моста состоят из одинаковых ЧЭ, изменения сопротивлений которых в смежных плечах попарно противоположны, т. е.

$$\Delta R_1 = -\Delta R_2; \Delta R_3 = -\Delta R_4.$$

Тогда при линейных характеристиках ЧЭ напряжение разбаланса будет линейно зависеть от изменений этих сопротивлений:

$$U_{\text{вых}} = \mathcal{E} \frac{(\Delta R_2 + \Delta R_3)}{2R_0},$$

и при $\Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R$ функция преобразования имеет вид

$$U_{\text{вых}} = \mathcal{E} \frac{\Delta R}{R_0}.$$

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.

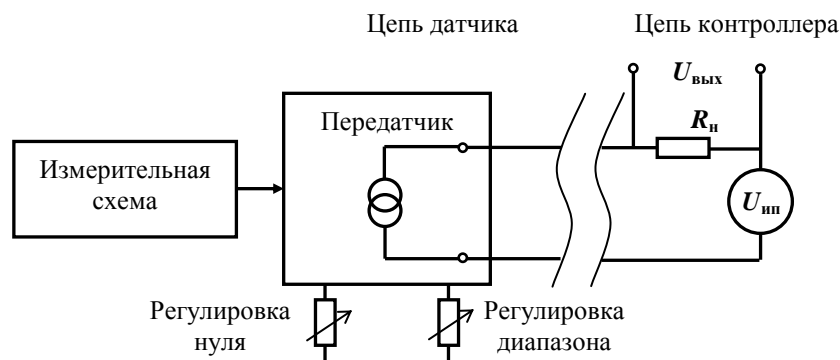


Рис. 2.21. Двухпроводной канал передачи аналоговых данных

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 $U_{\text{вых}} = Z_d I_{\text{ин}}$ и не зависит от сопротивлений R_1, R_2, R_3 и R_4 соединительных проводов.

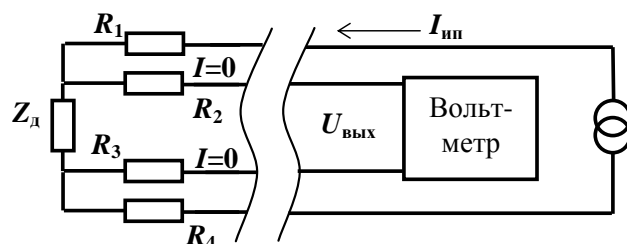


Рис. 2.22. Четырёхпроводной канал передачи аналоговых данных

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.

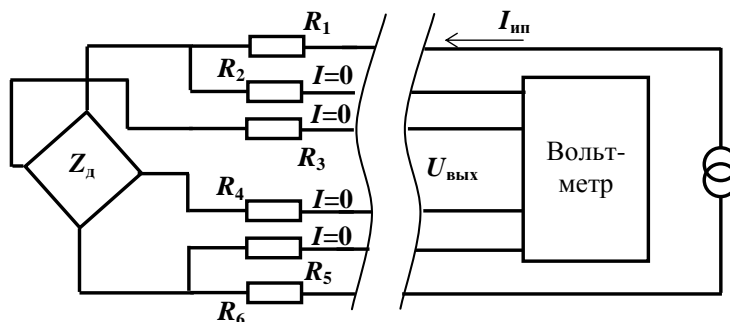


Рис. 2.23. Шестипроводной канал передачи аналоговых данных

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 автоматики, станков, а также средств измерения и неразрушающего контроля.

2. Понятия о дискретизации и квантовании сигналов

Создание микропроцессора, а затем и персонального компьютера фирмой ИВМ 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 $T_{\text{д}}$. Дискретизация реализует преобразование изменяющегося во времени сигнала $y(t)$ в решетчатую функцию $y[kT_{\text{д}}]$, где k — целое число. Функция преобразования при дискретизации имеет вид

$$y(t) \rightarrow y[kT_{\text{д}}]$$

Частоту дискретизации $f_{\text{д}} = 1/T_{\text{д}}$ 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

$$f_d \geq 2f_c.$$

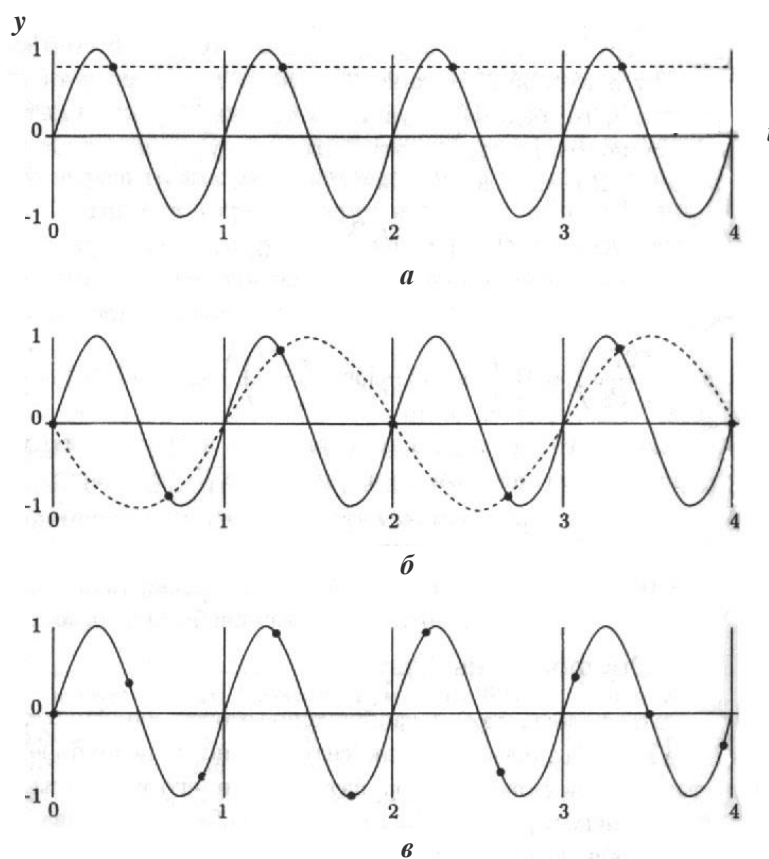


Рис. 2.27. Оцифровка и восстановление аналогового сигнала:

a — $f_d = f_c$; $б$ — $f_d = 1/4 f_c$; $в$ — $f_d = 10/4 f_c = 2,5 f_c$.

Это условие доказывается теоремой Котельникова⁶, 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 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, рав-

⁶ 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.

ной 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 $6f_{c\max}$.

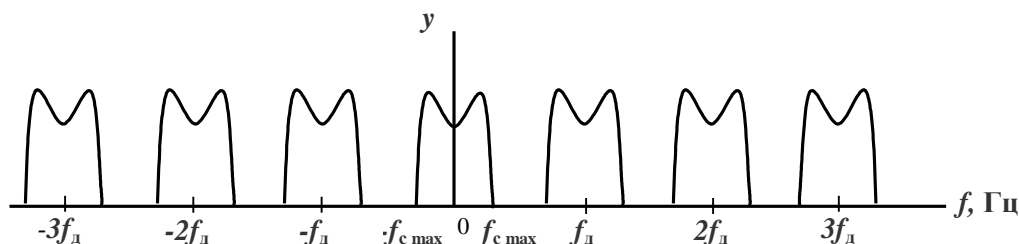


Рис. 2.28. Частотный спектр идеально дискретизированной функции

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 $y < \text{FS} \cdot \Delta_k$. Чем выше разрядность квантователя, тем ниже уровень шума квантования. Наибольшее значение уровня шума квантования определяют по формуле:

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

Например, при 16-битном квантовании $U_{\text{шк max}} = -96$ дБ, а при 20-битном -120 дБ. Тогда учитывая, что 0 дБ — это величина максимального по уровню сигнала, а $U_{\text{шк max}}$ — уровень шума квантования можно считать, что динамический диапазон квантователя равен $-U_{\text{шк max}}$ 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 сигнала⁷. Следовательно, увеличение частоты дискретизации и разрядности квантователя ведут к расширению спектра оцифрованного сигнала.

Дискретизация сигнала во времени и его линейное квантование по амплитуде называется импульсно-кодовой модуляцией (англ. Pulse Code Modulation, или PCM). В результате преобразования получается

⁷ Этот эффект был обнаружен американским математиком Дж. Гиббсом и получил название в его честь.

импульсный сигнал ступенчатой формы. Ширина импульса равна периоду дискретизации $1/f_{\text{д}}$, а высота - квантованному значению амплитуды входного сигнала.

3. 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 синхронный. 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 оптоволокна и сопутствующего оборудования.

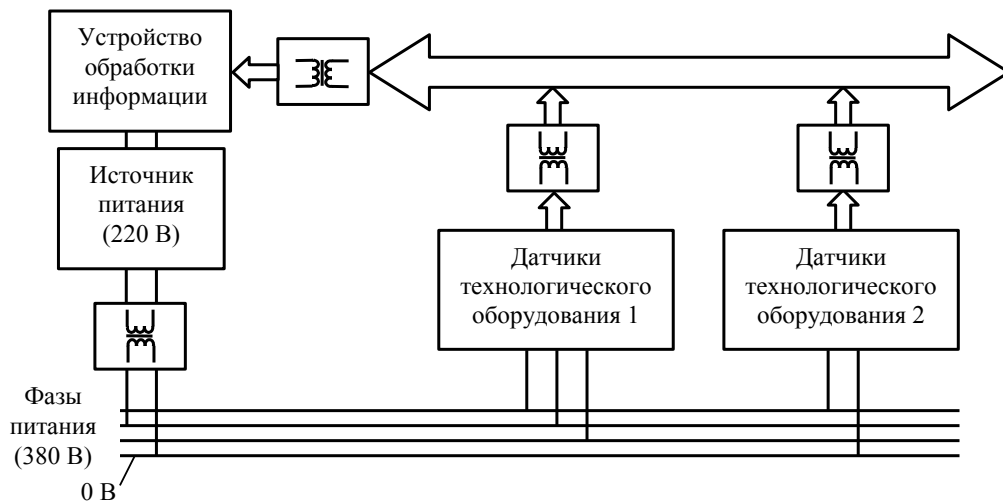


Рис. 2.29. Гальваническая развязка в распределенной системе сбора данных в цеху

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».

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 котором 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 посылка 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 дуплекс⁸). В компьютерных устройствах интерфейс реализуется с помощью коммуникационного COM-порта.

⁸ Режим, передачи данных позволяющий одновременно принимать и передавать данные по двум направлениям.

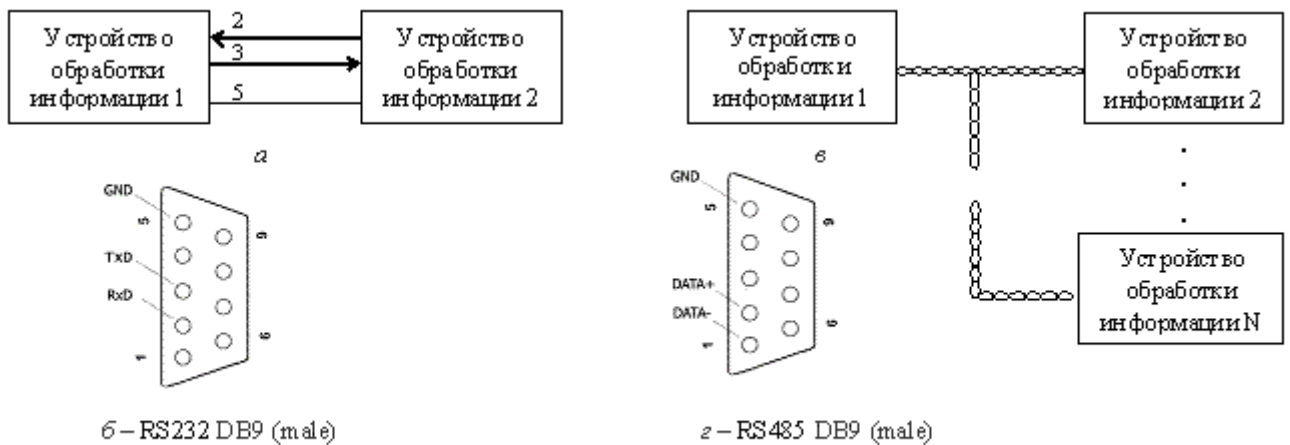


Рис. 2.30. Последовательные интерфейсы и их разъемы а, б – RS232; в, з – RS485 (Advantech)

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 связь⁹, 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.

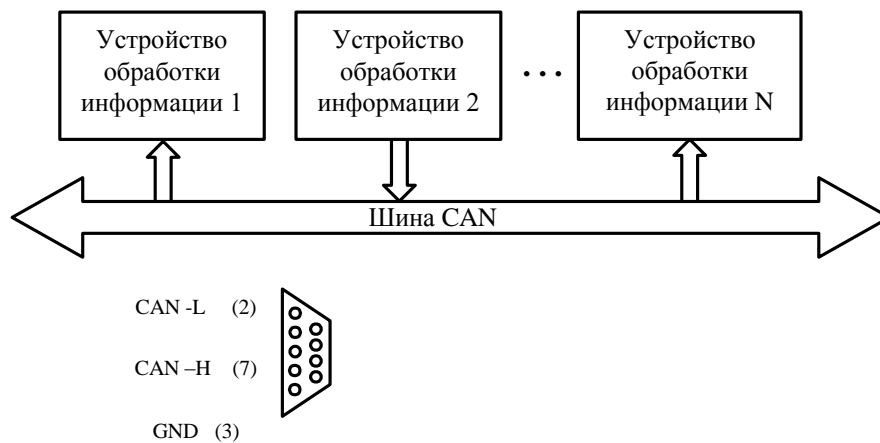


Рис. 2.31. Интерфейс CAN

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

⁹ Режим передачи данных, при котором в каждый момент времени передача идет в одном направлении.

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).

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

Еще одним вариантом беспроводного последовательного интерфейса является интерфейс, построенный по технологии *Bluetooth* для систем сотовой телефонии работающий в диапазоне частот 2,4 ГГц¹⁰. 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.

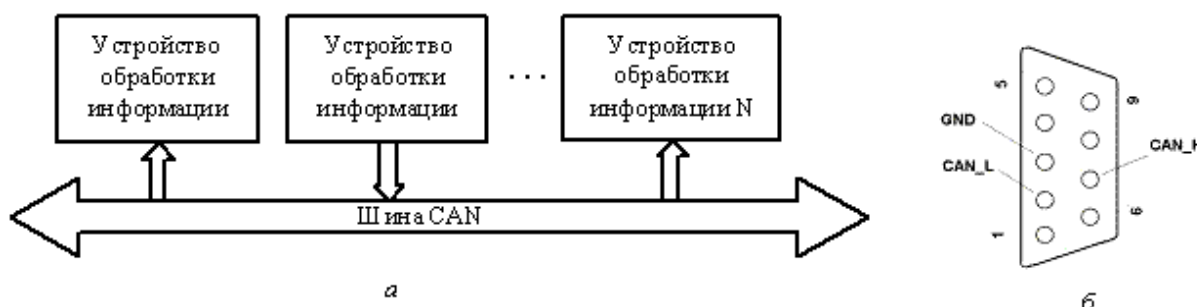


Рис. 2.32. Интерфейс (а) и разъем (б) CAN

SPI (англ. *Serial Peripheral Interface*) представляет собой полнодуплексный скоростной синхронный четырёхпроводной интерфейс. В настоящее время его поддерживают не только AVR-контроллеры, но и

¹⁰ Интерфейс получил название в честь датского короля викингов Гарольда Блутуса, вошедшего в историю как собирателя земель скандинавских.

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.

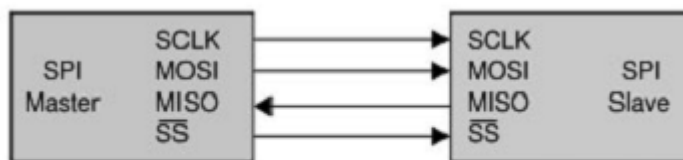


Рис. 2.32. Структура интерфейса SPI

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-Integrated Circuit, сокращенно — InterIC, или ИС 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.

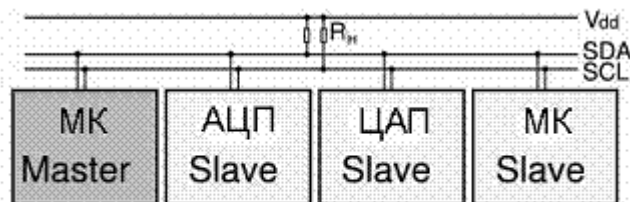


Рис. 2.33. Пример использования интерфейса I²C

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.