

# Системы реального времени

## Лекция 2

### Аппаратные средства на нижнем и среднем уровне в системах реального времени

#### Измерительные устройства

##### Датчики

Датчики (или первичные измерительные преобразователи) – это устройства, выполняющие преобразование значения физической величины (температуры, давления, перемещения и т.п.) в электрический сигнал. При этом информация может быть заключена в величине напряжения, тока или частоты изменения сигнала [Климентьев].

В зависимости от типа выходных сигналов датчиков различают: аналоговые, дискретные и интеллектуальные (со встроенной электроникой и внешним цифровым интерфейсом).

##### Аналоговые датчики

Важнейшей технической характеристикой любого аналогового датчика является зависимость величины выходного сигнала от значения физической величины на его входе – *функция преобразования*. Для большинства аналоговых датчиков (как, например, для резистивного датчика температуры (терморезистора)) она нелинейная (см. рисунок 1), но на некоторых интервалах значений входной величины может быть приблизительно описана линейной функцией, например для меди:

$$R = R_0(1 + \alpha T) \quad (1)$$

где  $\alpha$  – термоэлектрический коэффициент меди,  $R_0$  – сопротивление при  $0^\circ\text{C}$ .

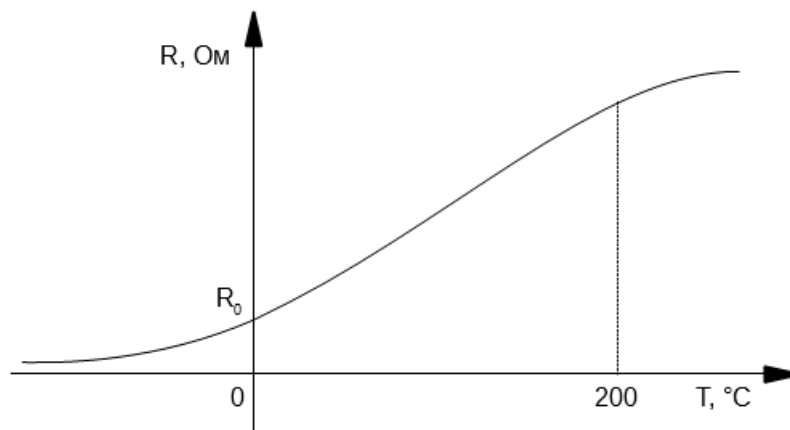


Рисунок 1 – Функция преобразования терморезистора

Принцип действия терморезистора основан на зависимости электрического сопротивления металлов (например, меди (Cu) или платины (Pt)) от температуры.

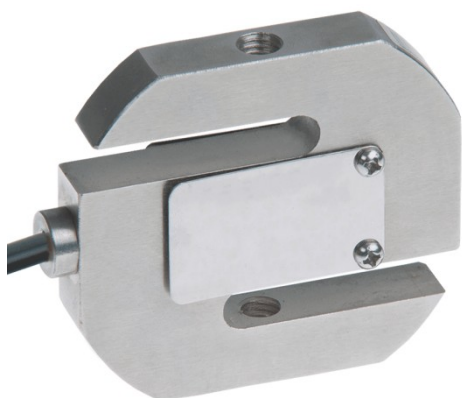
Кроме функции преобразования, основными характеристиками датчиков являются:

- *рабочий диапазон* измеряемых значений;
- *предельная погрешность* – характеристика, отражающая свойство датчика выполнять преобразование с определенной ошибкой, например, с величиной не более 0,1% от ширины диапазона входной величины.

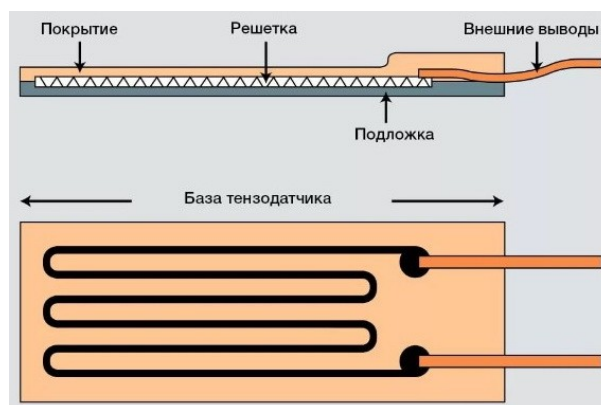
Другими характеристиками датчиков, часто указываемыми в документации, являются *чувствительность* (первая производная от функции преобразования), *постоянная времени* (временной интервал, в течение которого завершаются переходные процессы в датчике), *АЧХ* (*амплитудно-частотная характеристика*) – функция, характеризующая влияние частоты изменения физической величины на результат преобразования, и т.п.

### Датчики измерения деформации

Тензорезистивный датчик (тензодатчик) обычно представляет собой упругую конструкцию с закреплённым на ней тензорезистором (рисунок 2). По изменению сопротивления тензорезистора (при его сжатии или растяжении) можно вычислить степень деформации, которая будет пропорциональна силе, приложенной к конструкции.



а) внешний вид S-образного тензорезистивного датчика



б) устройство простейшего проволочного тензорезистора

Рисунок 2 – Тензорезистивный датчик

У аналоговых тензодатчиков выходной сигнал составляют милливольты. Характерным параметром таких датчиков является рабочий коэффициент передачи – РКП и составляет для разных моделей 1мВ/В, 2мВ/В, 5мВ/В, 10мВ/В. Некоторые современные тензорезистивные датчики помимо одного или нескольких измерительных элементов содержат также аналого-цифровой преобразователь и преобразователь интерфейса.

Самыми простыми являются *одноточечные датчики*, применяются в изготовлении платформенных весов малой грузоподъемности, оборудовании для фасовки, а также в бытовых электронных весах, торговых и лабораторных средствах измерения веса.

*Тензодатчики балка на изгиб или сдвиг* используются в системах дозирования, платформенных весах средней грузоподъемности, бункерах, напольных системах взвешивания, включая электронные весы для взвешивания животных.

В высокоточных системах измерения веса с высоким показателем наибольшего предела взвешивания в промышленности и на железнодорожном транспорте применяются

*тензодатчики торсионного типа*, в качестве упругого элемента используется кольцо, при воздействии на которое происходит упругая деформация скручивания.

*S-образные тензодатчики* применяются для осуществления взвешивания грузов в конструкции крановых весов, а также в подвесных системах, при этом упругий элемент с тензорезисторами работает на растяжение. [<http://vesovoy.info/tenzodatchiki/vidy-tipy-tenzodatchkov>]

### Датчики измерения температуры

В современном промышленном производстве наиболее распространенными являются измерения температуры (так, на атомной электростанции среднего размера имеется около 1500 точек, в которых производится такое измерение, а на крупном предприятии химической промышленности подобных точек присутствует свыше 20 тыс.).

Если рассматривать датчики температуры для промышленного применения, то можно выделить их основные классы: кремниевые датчики температуры, биметаллические датчики, жидкостные и газовые термометры, термоиндикаторы, термисторы, термопары, термопреобразователи сопротивления, инфракрасные датчики.

Термопара представляет собой две проволоки из разных металлов, спаянных между собой (рисунок 3). При разности температур между горячим и холодным концом в цепи возникает электрический ток. Величина этого электрического тока зависит от термоэлектрической силы термопары, и составляет от 40 до 60 мкВ, в зависимости от материала термопары. Для изготовления термопар чаще всего используют сплавы: копель (56% Cu и 44% Ni), алюмель (95% Ni, остальные – Al, Si и Mn), хромель (90% Ni и 10% Cr), платинородий (90% Pt и 10% Rh).



Рисунок 3 – Внешний вид термопары

Термопара является высокоточным датчиком температуры, однако эту точность достаточно проблематично получить. Термопара является относительным датчиком температуры, уровень ее напряжения имеет зависимость от температурной разности между спаями. При этом холодный спай находится при комнатной температуре или при какой-либо другой.

Рассмотрим работу термопары ближе. Есть две термопары и две температуры горячего и холодного спая. Соответственно ЭДС зависит от разности температур. Температуру холодного спая необходимо компенсировать. Аппаратным способом компенсации является использование второй термопары, которая помещена в заранее известную температуру.

Функция преобразования термопары нелинейна. Для перевода ЭДС в температуру и обратно используются коэффициенты полинома большого порядка.

Термо-ЭДС термопары составляет от единиц до сотен микровольт. Соответственно, применение аналого-цифровых преобразователей возможно только после усиления сигнала. [<https://electrosam.ru/glavnaja/jelektrooborudovanie/ustrojstva/datchiki-temperatury/>]

Термопары имеют следующие преимущества: простота изготовления и надёжность в эксплуатации, дешевизна, отсутствие источников питания и возможность измерений в большом диапазоне температур. Наряду с этим термопарам свойственны и некоторые недостатки – меньшая, чем у терморезисторов, точность измерения, наличие значительной тепловой инерционности, необходимость введения поправки на температуру свободных концов и необходимость в применении специальных соединительных проводов. [[http://electrolibrary.info/subscribe/sub\\_16\\_datchiki.htm](http://electrolibrary.info/subscribe/sub_16_datchiki.htm)]

#### Термометр сопротивления

Принцип действия термопреобразователей сопротивления (терморезисторов) основан на изменении электрического сопротивления проводников и полупроводников в зависимости от температуры.

Платиновые терморезисторы предназначены для измерения температур в пределах от -260 до 1100 °С. Широкое распространение на практике получили более дешёвые медные терморезисторы, имеющие линейную зависимость сопротивления от температуры.

Недостатком меди является небольшое ее удельное сопротивление и легкая окисляемость при высоких температурах, вследствие чего конечный предел применения медных термометров сопротивления ограничивается температурой 180 °С. По стабильности и воспроизводимости характеристик медные терморезисторы уступают платиновым. Никель используется в недорогих датчиках для измерения в диапазоне комнатных температур.

Полупроводниковые терморезисторы (термисторы) имеют отрицательный или положительный температурный коэффициент сопротивления, значение которого при 20 °С составляет  $(2..8) \cdot 10^{-2} (\text{°C})^{-1}$ , т.е. на порядок больше, чем у меди и платины. Полупроводниковые терморезисторы при весьма малых размерах имеют высокие значения сопротивления (до 1 МОм). В качестве полупроводникового материала используются оксиды металлов: полупроводниковые терморезисторы типов КМТ – смесь оксидов кобальта и марганца и ММТ – меди и марганца.

Полупроводниковые датчики температуры обладают высокой стабильностью характеристик во времени и применяются для измерения температур в диапазоне от -100 до 200 °С. [[http://electrolibrary.info/subscribe/sub\\_16\\_datchiki.htm](http://electrolibrary.info/subscribe/sub_16_datchiki.htm)]

#### Датчики освещения

Различают аналоговые и дискретные оптические (фотоэлектрические) датчики. У аналоговых датчиков выходной сигнал изменяется пропорционально внешней освещённости. Основная область применения – автоматизированные системы управления освещением.

#### Фотосопротивление

#### Датчик виброускорения (акселерометр)

## Датчик влажности

### Дискретные датчики

Дискретные датчики преобразуют некую физическую характеристику состояния объекта (например, состояние клапана – «закрыт» или «открыт») в значения цифрового сигнала 0 («ложь») или 1 («истина»).

### Примеры дискретных датчиков

#### Контактные датчики

Контактные датчики — это простейший вид резисторных датчиков, которые преобразуют перемещение первичного элемента в скачкообразное изменение сопротивления электрической цепи. С помощью контактных датчиков измеряют и контролируют усилия, перемещения, температуру, размеры объектов, контролируют их форму и т. д. К контактным датчикам относятся путевые и концевые выключатели, контактные термометры и так называемые электродные датчики, используемые в основном для измерения предельных уровней электропроводных жидкостей.

Контактные датчики могут работать как на постоянном, так и на переменном токе. В зависимости от пределов измерения контактные датчики могут быть одно предельными и многопредельными. Последние используют для измерения величин, изменяющихся в значительных пределах, при этом части резистора  $R$ , включенного в электрическую цепь, последовательно закорачиваются.

Недостаток контактных датчиков — сложность осуществления непрерывного контроля и ограниченный срок службы контактной системы. Но благодаря предельной простоте этих датчиков их широко применяют в системах автоматики. [[http://electrolibrary.info/subscribe/sub\\_16\\_datchiki.htm](http://electrolibrary.info/subscribe/sub_16_datchiki.htm)]

#### Датчики препятствий

Фотоэлектрические датчики могут быть применены практически во всех отраслях промышленности. Датчики дискретного действия используются как своеобразные бесконтактные выключатели для подсчета, обнаружения, позиционирования и других задач на любой технологической линии.

Оптический бесконтактный датчик, регистрирует изменение светового потока в контролируемой области, связанное с изменением положения в пространстве каких-либо движущихся частей механизмов и машин, отсутствия или присутствия объектов. Благодаря большим расстояниям срабатывания оптические бесконтактные датчики нашли широкое применение в промышленности и не только.

Оптический бесконтактный датчик состоит из двух функциональных узлов, приемника и излучателя. Данные узлы могут быть выполнены как в одном корпусе, так и в различных корпусах.

По методу обнаружения объекта фотоэлектрические датчики подразделяются на 4 группы:

1) пересечение луча - в этом методе передатчик и приемник разделены по разным корпусам, что позволяет устанавливать их напротив друг друга на рабочем расстоянии. Принцип работы основан на том, что передатчик постоянно посылает световой луч, который принимает приемник. Если световой сигнал датчика прекращается, в следствии перекрытия сторонним объектом, приемник немедленно реагирует меняя состояние выхода.

2) отражение от рефлектора - в этом методе приемник и передатчик датчика находятся в одном корпусе. Напротив датчика устанавливается рефлектор (отражатель). Датчики с рефлектором устроены так, что благодаря поляризационному фильтру они воспринимают отражение только от рефлектора. Это рефлекторы, которые работают по принципу двойного отражения. Выбор подходящего рефлектора определяется требуемым расстоянием и монтажными возможностями.

Посылаемый передатчиком световой сигнал отражаясь от рефлектора попадает в приемник датчика. Если световой сигнал прекращается, приемник немедленно реагирует, меняя состояние выхода.

3) отражение от объекта - в этом методе приемник и передатчик датчика находятся в одном корпусе. Во время рабочего состояния датчика все объекты, попадающие в его рабочую зону, становятся своеобразными рефлекторами. Как только световой луч отразившись от объекта попадает на приемник датчика, тот немедленно реагирует, меняя состояние выхода.

4) фиксированное отражение от объекта - принцип действия датчика такой же как и у "отражение от объекта" но более чутко реагирующий на отклонение от настройки на объект. Например, возможно детектирование вздутой пробки на бутылке с кефиром, неполное наполнение вакуумной упаковки с продуктами и т.д.

По своему назначению фотодатчики делятся на две основные группы: датчики общего применения и специальные датчики. К специальным, относятся типы датчиков, предназначенные для решения более узкого круга задач. К примеру, обнаружение цветной метки на объекте, обнаружение контрастной границы, наличие этикетки на прозрачной упаковке и т.д.

Задача датчика обнаружить объект на расстоянии. Это расстояние варьируется в пределах 0,3мм-50м, в зависимости от выбранного типа датчика и метода обнаружения. [[http://electrolibrary.info/subscribe/sub\\_16\\_datchiki.htm](http://electrolibrary.info/subscribe/sub_16_datchiki.htm)]

#### Микроволновые датчики

На смену кнопочно - релейным пультам приходят микропроцессорные автоматические системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) высочайшей производительности и надежности, датчики оснащаются цифровыми интерфейсами связи,

однако это не всегда приводит к повышению общей надежности системы и достоверности ее работы. Причина заключается в том, что сами принципы действия большинства известных типов датчиков накладывают жесткие ограничения на условия, в которых они могут использоваться.

Например, для слежения за скоростью движения промышленных механизмов широко применяются бесконтактные (емкостные и индуктивные), а также тахогенераторные устройства контроля скорости (УКС). Тахогенераторные УКС имеют механическую связь с движущимся объектом, а зона чувствительности бесконтактных приборов не превышает нескольких сантиметров.

Все это не только создает неудобства при монтаже датчиков, но и существенно затрудняет использование этих приборов в условиях пыли, которая налипает на рабочие поверхности, вызывая ложные срабатывания. Перечисленные типы датчиков не способны напрямую контролировать объект (например, ленту конвейера) - они настраиваются на движение роликов, крыльчаток, натяжных барабанов и т. д. Выходные сигналы некоторых приборов настолько слабы, что лежат ниже уровня промышленных помех от работы мощных электрических машин.

Аналогичные трудности возникают при использовании традиционных сигнализаторов уровня - датчиков наличия сыпучего продукта. Такие устройства необходимы для своевременного отключения подачи сырья в производственные емкости. К ложным срабатываниям приводит не только налипание и пыль, но и прикосновение потока продукта при его поступлении в бункер. В неотапливаемых помещениях на работу датчиков влияет окружающая температура. Ложные срабатывания сигнализаторов вызывают частые остановки и запуски нагруженного технологического оборудования - основную причину его аварий, приводят к завалам, обрыву конвейеров, возникновению пожаро- и взрывоопасных ситуаций.

Указанные проблемы несколько лет назад привели к разработке принципиально новых типов приборов - радиолокационных датчиков контроля скорости, датчиков движения и подпора, работа которых основана на взаимодействии контролируемого объекта с радиосигналом частотой около 1010 Гц.

Использование микроволновых методов контроля за состоянием технологического оборудования позволяет полностью избавиться от недостатков датчиков традиционных типов.

Отличительными особенностями этих устройств являются:

- отсутствие механического и электрического контакта с объектом (средой), расстояние от датчика до объекта может составлять несколько метров;
- непосредственный контроль объекта (транспортной ленты, цепи) а не их приводов, натяжных барабанов и т. д.;
- малое энергопотребление;
- нечувствительность к налипанию продукта за счет больших рабочих расстояний;
- высокая помехоустойчивость и направленность действия;



- разовая настройка на весь срок службы;
- высокая надежность, безопасность, отсутствие ионизирующих излучений.

Принцип действия датчика основан на изменении частоты радиосигнала, отраженного от движущегося объекта. Это явление ("эффект Доплера") широко используется в радиолокационных системах для дистанционного измерения скорости. Движущийся объект вызывает появление электрического сигнала на выходе микроволнового приемо-передающего модуля.

Так как уровень сигнала зависит от свойств отражающего объекта, датчики движения могут использоваться для того, чтобы сигнализировать об обрыве цепи (ленты), наличии на конвейерной ленте каких-либо предметов или материалов. Лента имеет гладкую поверхность и низкий коэффициент отражения. Когда мимо датчика, установленного над рабочей веткой транспортера, начинает двигаться продукт, увеличивая коэффициент отражения, прибор сигнализирует о движении, то есть, фактически о том, что лента не пуста. По длительности выходного импульса можно на значительном расстоянии судить о размере перемещаемых предметов, производить селекцию и т.д.

При необходимости заполнить какую-либо емкость (от бункера до шахты) можно точно определить момент окончания засыпки - опущенный на определенную глубину датчик будет показывать движение наполнителя до тех пор, пока не будет засыпан.

Конкретные примеры использования микроволновых датчиков движения в различных отраслях промышленности определяются ее спецификой, но в целом они способны решать самые разнообразные задачи безаварийной эксплуатации оборудования и повысить информативность автоматизированных систем управления.

[[http://electrolibrary.info/subscribe/sub\\_16\\_datchiki.htm](http://electrolibrary.info/subscribe/sub_16_datchiki.htm)]

### Интеллектуальные датчики

Используемый иногда термин «*интеллектуальный датчик*» соответствует компактному, но сложному устройству, содержащему кроме собственно датчика схемы преобразования сигнала, управляющий микроконтроллер и, возможно, цифровой интерфейс.

### Примеры интеллектуальных датчиков

Самые первые бесконтактные датчики расстояния выдавали информацию только лишь о наличии или отсутствии предмета перед датчиком в виде дискретного сигнала ON/OFF. Эти простейшие датчики до сих пор находят огромное применение в различных областях промышленности. В то же время для решения более сложных задач автоматизации технологических процессов инженерам нужна дополнительная информация о положении объектов измерения. Для этих целей были разработаны датчики, позволяющие определять расстояние до объекта и его положение с помощью аналогового выхода, сигнал на котором пропорционален расстоянию до измеряемого объекта. Такие датчики могут быть использованы во множестве применений, таких как



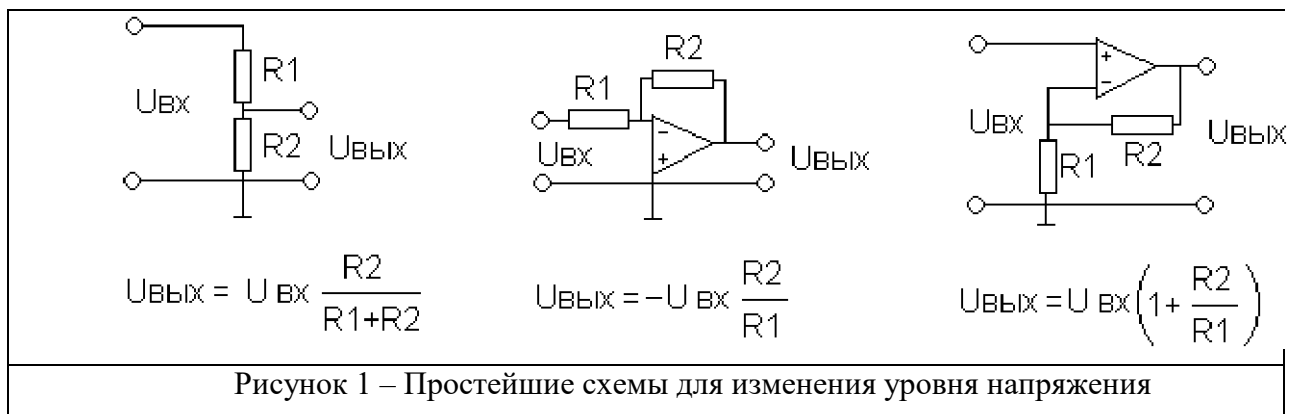
определение расстояния до объекта, измерение толщины, измерение наклона и деформации, измерение профиля изделия, центровка и измерение диаметра.

Датчики для измерения расстояния могут использовать различные принципы измерений: индуктивный, ультразвуковой или оптический, однако все они имеют электрический выходной сигнал, величина которого пропорциональна расстоянию до измеряемого объекта. В таблице 1 представлены основные типы аналоговых бесконтактных датчиков для измерения расстояний и их основные особенности. [[http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/publ/sensor/analog\\_sensor.htm](http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/publ/sensor/analog_sensor.htm)]

### Промежуточные измерительные преобразователи

*Промежуточные измерительные преобразователи* – устройства, сохраняющие вид представления сигнала (например, напряжение остается напряжением) и его форму, но изменяющие его величину. Они необходимы в тех случаях, когда электрический сигнал, поступающий с датчика, слишком слаб по величине, либо слишком силен, либо засорен помехами и т.п. К устройствам этого типа относятся разнообразные усилители, нормализаторы, фильтры и пр. Нередко они конструктивно входят в состав датчика (например, мостовая схема подключения термосопротивлений). Как правило, промежуточные преобразователи тоже имеют функцию преобразования простого вида  $y = a \cdot x$ , которую можно описать единственным числом – коэффициентом усиления  $a$ .

Существуют как простые усилители, представляющие собой электронные схемы на основе резисторов и операционных усилителей (см. рисунок 1), так и сложные многофункциональные устройства с программируемым извне или автоматически настраиваемым коэффициентом усиления.



### Аналогово-цифровые преобразователи

*Аналогово-цифровые преобразователи (АЦП)* – устройства, предназначенные для преобразования значения электрического сигнала в число.

Такое преобразование происходит не мгновенно (этот временной интервал называется *временем преобразования АЦП*), поэтому динамически изменяющийся непрерывный электрический сигнал, поступающий на вход АЦП, на выходе

преобразуется в дискретную последовательность чисел. Типичное время преобразования современных АЦП: от  $10^{-3}$  до  $10^{-7}$  с.

Каждое число на выходе у АЦП представляется конечным количеством двоичных разрядов (эта характеристика называется *разрядностью АЦП*), следовательно, множество всевозможных числовых значений на выходе у АЦП ограничено: например, если разрядность АЦП  $N=2$ , то всего возможно 4 различных результата преобразования (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Возможные значения на выходе двухразрядного АЦП

Разряды числа в двоичной системе счисления		Результат в десятичной системе счисления
1 (старший разряд)	0 (младший разряд)	
0	0	0
0	1	1
1	0	2
1	1	3

Типичные значения разрядности современных АЦП: от 8 до 24.

Таким образом, работа АЦП заключается в выполнении двух операций (см. рисунок 2):

- квантование сигнала по уровню;
- дискретизация сигнала по времени.

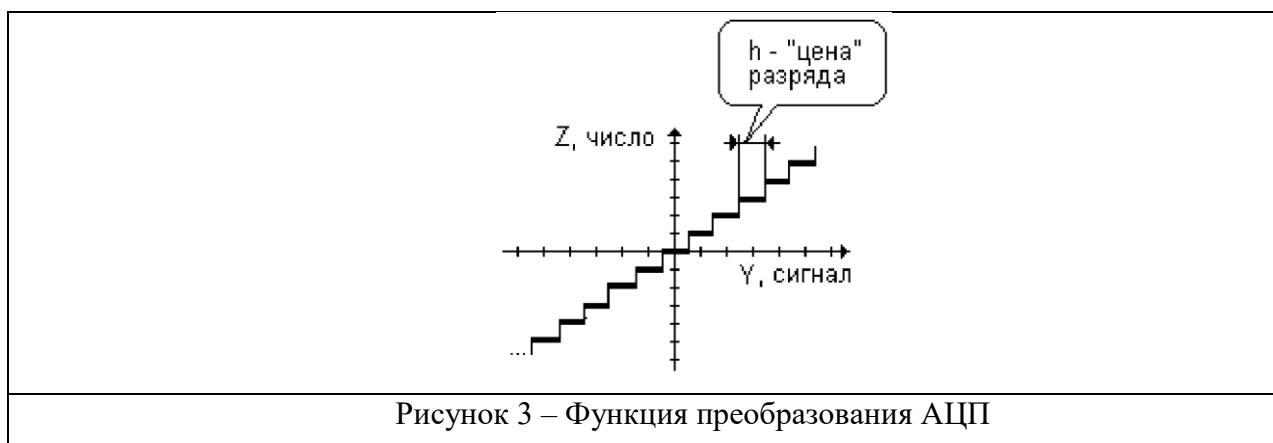


Функция преобразования АЦП имеет вид «ступенчатой кривой» (см. рисунок 3) и может быть описана формулой (1):

$$Z = \left[ \frac{Y + 0,5}{h} \right] \quad (1)$$

где  $Y$  – преобразуемый электрический сигнал;  $Z$  – числовой результат преобразования;  $h$  – величина входного сигнала, соответствующая одному биту (разряду) выходного числа;  $[...]$  – операция округление числа до целого значения.

Таким образом, в любом АЦП происходит преобразование близких значений электрического сигнала в одно общее числовое значение, что приводит к погрешности квантования, не превышающей по величине  $h/2$  (см. рисунок 3).



Итак, наиболее важные технические характеристики АЦП:

- *входной диапазон* (диапазон измеряемых значений тока или напряжения, например  $\pm 5\text{В}$ );
- *разрядность* (количество двоичных разрядов, которыми представляется выходное значение, например 16);
- *время преобразования* (например, 0.00001 сек).

Принцип работы АЦП состоит в измерении уровня входного сигнала и выдаче результата в цифровой форме. В результате работы АЦП непрерывный аналоговый сигнал превращается в импульсный, с одновременным измерением амплитуды каждого импульса.

### Цифро-аналоговые преобразователи

*Цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП)* – устройства, предназначенные для преобразования числовой величины в электрический сигнал (напряжение или ток). Свойства и технические характеристики ЦАП аналогичны АЦП.

### Цифро-аналоговый преобразователь

Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) предназначен для преобразования числа, определенного, как правило, в виде двоичного кода, в напряжение или ток, пропорциональные значению цифрового кода. Схемотехника цифро-аналоговых преобразователей весьма разнообразна. Кроме этого, интегральные микросхемы (ИМС) цифро-аналоговых преобразователей классифицируются по следующим признакам [<http://www.limi.ru/dacs/dacsindex.htm>]:

По виду выходного сигнала:

с токовым выходом;

выходом в виде напряжения.

По типу цифрового интерфейса:

с последовательным вводом;

с параллельным вводом входного кода.

По числу ЦАП на кристалле:

одноканальные;

многоканальные.

По быстродействию:

умеренного быстродействия;

высокого быстродействия.

По разрядности:

с малым разрешением;

с высоким разрешением.

Большинство схем параллельных ЦАП основано на *суммировании весовых токов*, сила каждого из которых пропорциональна весу цифрового двоичного разряда, причем должны суммироваться только токи разрядов, значения которых равны 1. Но у таких ЦАП есть недостатки. Впрочем, с ними более или менее успешно борются схемотехническими решениями. Пример – микросхема AD7520. ЦАП на источниках тока обладают более высокой точностью, в отличие от ЦАП с суммированием токов, где весовые токи формируются резисторами сравнительно небольшого сопротивления и, как следствие, зависят от сопротивления ключей и нагрузки. В данном же случае весовые токи обеспечиваются транзисторными источниками тока, имеющими высокое динамическое сопротивление. Примеры – микросхемы AD565, AD668 и AD9764.

Существует несколько способов *формирования выходного напряжения* для ЦАП с суммированием весовых токов. Например, схема с преобразователем тока в напряжение на операционном усилителе (ОУ) или с помощью резистора. Примеры – AD565A, MAX531, MAX542, AD7390.

Основой параллельных ЦАП на переключаемых конденсаторах является матрица конденсаторов, емкости которых соотносятся как целые степени двух.

На рисунке 1 представлена классификационная схема ЦАП по схемотехническим признакам.

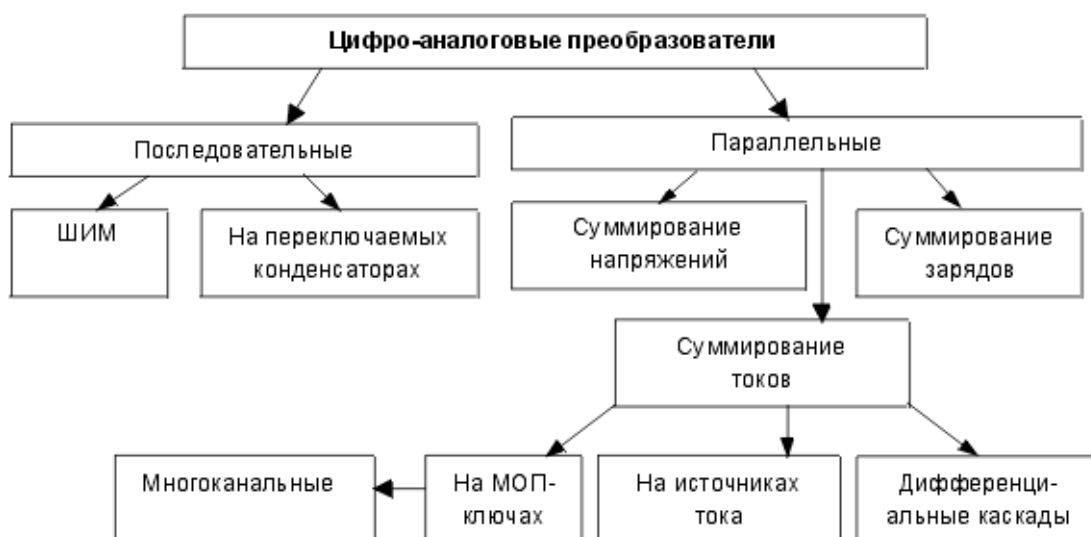


Рисунок 1 – Классификация ЦАП по схемотехническим признакам

Основными характеристиками ЦАП являются [<http://www.lcard.ru/lexicon/dac>]:

Диапазон выходных напряжений.

Динамический диапазон.

Выходной ток (или характеристики номинальной нагрузки).

Полоса частот воспроизведения выходного сигнала.

Период (частота) преобразования. Для асинхронных ЦАП нормируется время преобразования.

Время установления выходного сигнала.

Коэффициент нелинейных искажения.

Погрешность воспроизведения напряжения постоянного и переменного тока.

Последовательные ЦАП

ЦАП с широтно-импульсной модуляцией

Очень часто ЦАП входит в состав микропроцессорных систем. В этом случае, если не требуется высокое быстродействие, цифро-аналоговое преобразование может быть очень просто осуществлено с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ, Pulse-Width Modulation (PWM)). Схема ЦАП с ШИМ приведена на рисунке 2а. Широтно-импульсный модулятор – простейший тип ЦАП. Стабильный источник тока или напряжения периодически включается на время, пропорциональное преобразуемому цифровому коду, далее полученная импульсная последовательность фильтруется аналоговым фильтром нижних частот (рисунок 2б). Такой способ часто используется для управления скоростью вращения электродвигателей.



а) Схема ЦАП с ШИМ;

б) Последовательность импульсов на выходе ЦАП с ШИМ.

Рисунок 2 – ЦАП с широтно-импульсной модуляцией

Наиболее просто организуется цифро-аналоговое преобразование в том случае, если микроконтроллер имеет встроенную функцию широтно-импульсного преобразования. Контроллер с помощью своего таймера/счетчика формирует последовательность импульсов, относительная длительность которых  $g = t_{и}/T$  (рисунок 2б) определяется соотношением:

$$\gamma = \frac{D}{2^N} \quad (1)$$

где:  $N$  – разрядность преобразования,  
 $D$  – преобразуемый код.

Фильтр нижних частот сглаживает импульсы, выделяя среднее значение напряжения. В результате выходное напряжение преобразователя:

$$U_{\text{вых}} = \gamma U_{\text{оп}} = \frac{DU_{\text{оп}}}{2^N} \quad (2)$$

где:  $N$  – разрядность преобразования,  
 $D$  – преобразуемый код,  
 $U_{\text{оп}}$  – опорное напряжение ЦАП.

Рассмотренная схема обеспечивает почти идеальную линейность преобразования, не содержит прецизионных элементов (за исключением источника опорного напряжения). Основной ее недостаток – низкое быстродействие.

#### Последовательный ЦАП на переключаемых конденсаторах

Рассмотренная выше схема ЦАП с ШИМ вначале преобразует цифровой код во временной интервал, который формируется с помощью двоичного счетчика квант за квантом, поэтому для получения  $N$ -разрядного преобразования необходимы  $2^N$  временных квантов (тактов). Схема последовательного ЦАП, приведенная на рисунке 3, позволяет выполнить цифро-аналоговое преобразование за значительно меньшее число тактов.

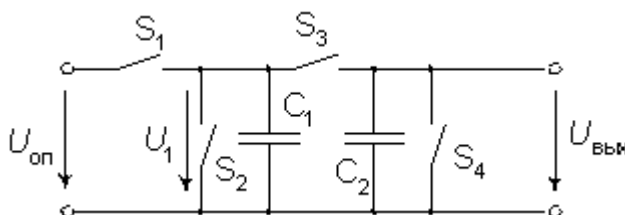


Рисунок 3 – Схема последовательного ЦАП на переключаемых конденсаторах

В этой схеме емкости конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  равны. Перед началом цикла преобразования конденсатор  $C_2$  разряжается ключом  $S_4$ . Входное двоичное слово задается в виде последовательного кода. Его преобразование осуществляется последовательно, начиная с младшего разряда  $D_0$ . Каждый такт преобразования состоит из двух полутактов. В первом полутакте конденсатор  $C_1$  заряжается до опорного напряжения  $U_{оп}$  при  $D_0=1$  посредством замыкания ключа  $S_1$  или разряжается до нуля при  $D_0=0$  путем замыкания ключа  $S_2$ . Во втором полутакте при разомкнутых ключах  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_4$  замыкается ключ  $S_3$ , что вызывает деление заряда пополам между  $C_1$  и  $C_2$ . В результате получаем:

$$U_{вых}(0) = U_1(0) = (D_0/2)U_{оп} \quad (3)$$

Пока на конденсаторе  $C_2$  сохраняется заряд, процедура заряда конденсатора  $C_1$  должна быть повторена для следующего разряда  $D_1$  входного слова. После нового цикла перезарядки напряжение на конденсаторах будет:

$$U_{вых}(1) = U_1(1) = \frac{(D_1 + D_0/2)U_{оп}}{2} = \frac{(2D_1 + D_0)U_{оп}}{4} \quad (4)$$

Точно также выполняется преобразование для остальных разрядов слова. В результате для  $N$ -разрядного ЦАП выходное напряжение будет равно:

$$U_{вых}(N-1) = U_1(N-1) = \frac{U_{оп}}{2^N} \sum_{k=0}^{N-1} D_k 2^k = \frac{U_{оп}}{2^N} D \quad (5)$$

Если требуется сохранять результат преобразования сколь-нибудь продолжительное время, к выходу схемы следует подключить устройство выборки и хранения (УВХ). После окончания цикла преобразования следует провести цикл выборки, перевести УВХ в режим хранения и вновь начать преобразование.

Таким образом, представленная схема выполняет преобразование входного кода за  $2N$  квантов, что значительно меньше, чем у ЦАП с ШИМ. Здесь требуется только два согласованных конденсатора небольшой емкости. Конфигурация аналоговой части схемы не зависит от разрядности преобразуемого кода. Однако по быстродействию последовательный ЦАП значительно уступает параллельным цифро-аналоговым преобразователям, что ограничивает область его применения.

### Параллельные ЦАП

#### ЦАП с суммированием весовых токов

Большинство схем параллельных ЦАП основано на суммировании токов, сила каждого из которых пропорциональна весу цифрового двоичного разряда, причем должны суммироваться только токи разрядов, значения которых равны 1. Пусть, например, требуется преобразовать двоичный четырехразрядный код в аналоговый сигнал тока. У четвертого, старшего значащего разряда (СЗР) вес будет равен  $2^3=8$ , у третьего разряда –  $2^2=4$ , у второго –  $2^1=2$  и у младшего (МЗР) –  $2^0=1$ . Если вес МЗР  $I_{МЗР}=1$  мА, то  $I_{СЗР}=8$  мА, а максимальный выходной ток преобразователя  $I_{вых.макс}=15$  мА и соответствует коду 1111<sub>2</sub>. Понятно, что коду 1001<sub>2</sub>, например, будет соответствовать  $I_{вых}=9$  мА и т.д. Следовательно, требуется построить схему, обеспечивающую генерацию и коммутацию по заданным



законам точных весовых токов. Простейшая схема, реализующая указанный принцип, приведена на рисунке 4.

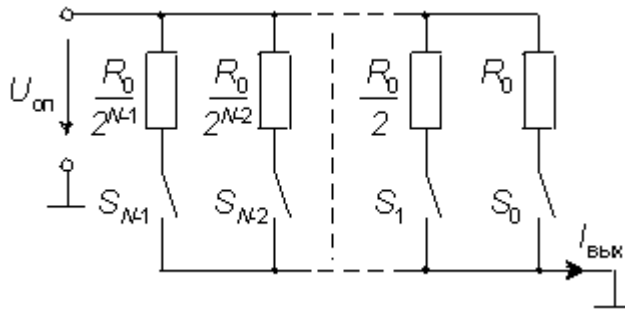


Рисунок 4 – Простейшая схема ЦАП с суммированием весовых токов

Сопротивления резисторов выбирают так, чтобы при замкнутых ключах через них протекал ток, соответствующий весу разряда. Ключ должен быть замкнут тогда, когда соответствующий ему бит входного слова равен единице. Выходной ток определяется соотношением:

$$I_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{оп}}}{R_0} \sum_{k=0}^{N-1} D_k 2^k = \frac{U_{\text{оп}}}{R_0} D \quad (6)$$

При высокой разрядности ЦАП токозадающие резисторы должны быть согласованы с высокой точностью. Наиболее жесткие требования по точности предъявляются к резисторам старших разрядов, поскольку разброс токов в них не должен превышать тока младшего разряда.

Рассмотренная схема при всей ее простоте обладает целым букетом недостатков. Во-первых, при различных входных кодах ток, потребляемый от источника опорного напряжения (ИОН), будет различным, а это повлияет на величину выходного напряжения ИОН. Во-вторых, значения сопротивлений весовых резисторов могут различаться в тысячи раз, а это делает весьма затруднительной реализацию этих резисторов в полупроводниковых ИМС. Кроме того, сопротивление резисторов старших разрядов в многоразрядных ЦАП может быть соизмеримым с сопротивлением замкнутого ключа, а это приведет к погрешности преобразования. В-третьих, в этой схеме к разомкнутым ключам прикладывается значительное напряжение, что усложняет их построение.

Эти недостатки устранены в схеме ЦАП AD7520 (отечественный аналог 572ПА1), разработанном фирмой Analog Devices в 1973 году, которая в настоящее время является по существу промышленным стандартом (по ней выполнены многие серийные модели ЦАП). Указанная схема представлена на рисунке 5. В качестве ключей здесь используются МОП-транзисторы.

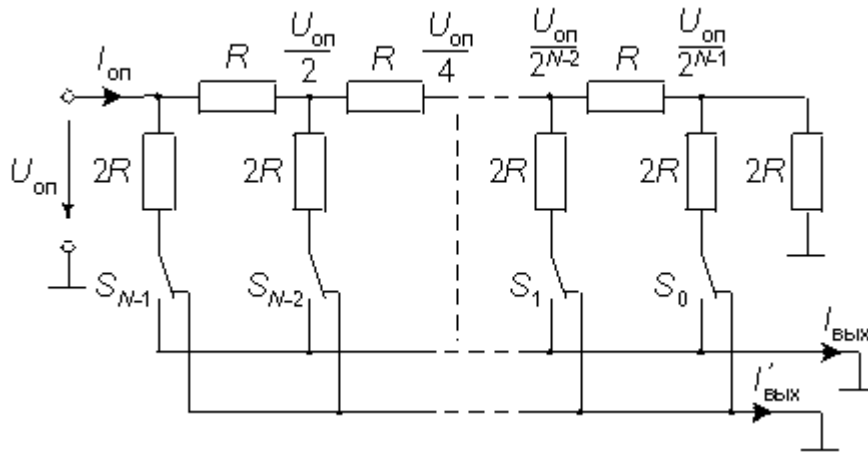


Рисунок 5 – Схема ЦАП с переключателями и матрицей постоянного импеданса

В этой схеме задание весовых коэффициентов ступеней преобразователя осуществляют посредством последовательного деления опорного напряжения с помощью резистивной матрицы постоянного импеданса. Основным элементом такой матрицы представляет собой делитель напряжения (рис. 5), который должен удовлетворять следующему условию: если он нагружен на сопротивление  $R_n$ , то его входное сопротивление  $R_{вх}$  также должно принимать значение  $R_n$ . Коэффициент ослабления цепи  $a=U_2/U_1$  при этой нагрузке должен иметь заданное значение. При выполнении этих условий получаем следующие выражения для сопротивлений:

ЦАП на источниках тока

ЦАП на источниках тока обладают более высокой точностью. В отличие от предыдущего варианта, в котором весовые токи формируются резисторами сравнительно небольшого сопротивления и, как следствие, зависят от сопротивления ключей и нагрузки, в данном случае весовые токи обеспечиваются транзисторными источниками тока, имеющими высокое динамическое сопротивление. Упрощенная схема ЦАП на источниках тока приведена на рисунке 6.

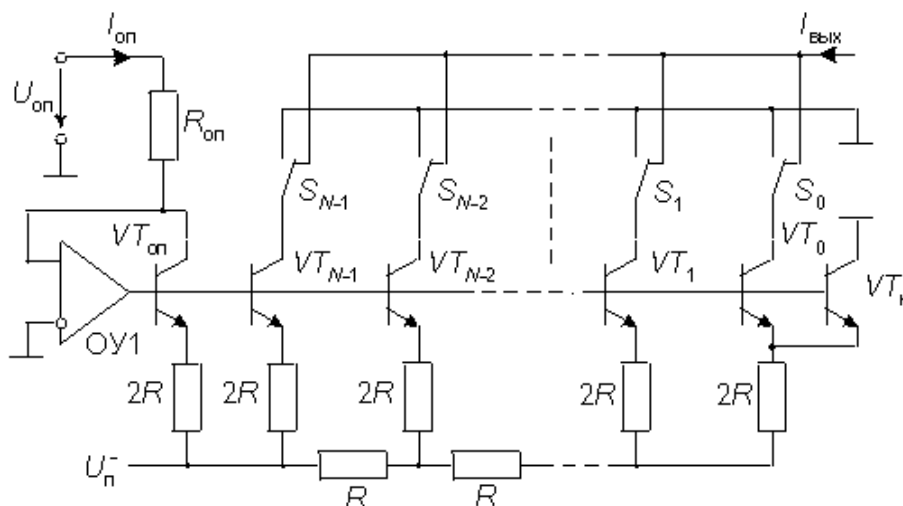


Рисунок 6 – Схема ЦАП на источниках тока

Весовые токи формируются с помощью резистивной матрицы. Потенциалы баз транзисторов одинаковы, а чтобы были равны и потенциалы эмиттеров всех транзисторов, площади их эмиттеров делают различными в соответствии с весовыми коэффициентами.

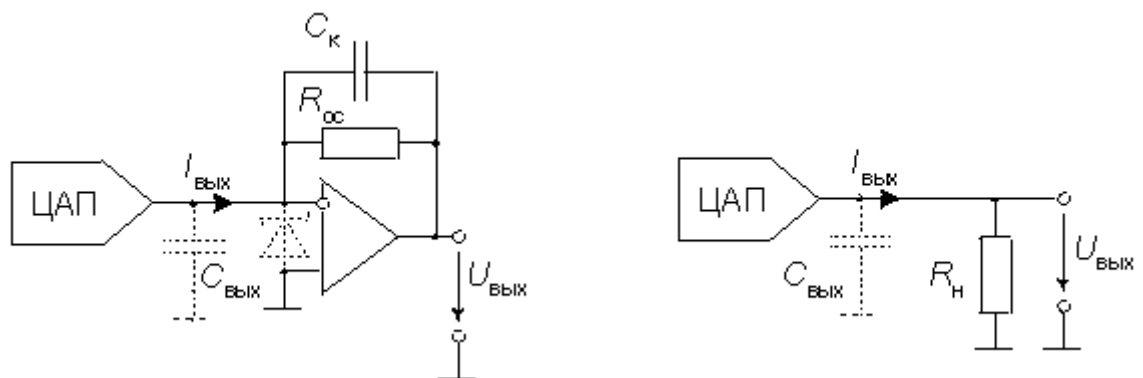
Правый резистор матрицы подключен не к общей шине, как на схеме рисунке 4, а к двум параллельно включенным одинаковым транзисторам  $VT_0$  и  $VT_n$ , в результате чего ток через  $VT_0$  равен половине тока через  $VT_1$ . Входное напряжение для резистивной матрицы создается с помощью опорного транзистора  $VT_{on}$  и операционного усилителя  $OU_1$ , выходное напряжение которого устанавливается таким, что коллекторный ток транзистора  $VT_{on}$  принимает значение  $I_{оп}$ . Выходной ток для N-разрядного ЦАП:

$$I_{\text{вых}} = \frac{I_{\text{оп}}}{2^N} D \quad (7)$$

Характерными примерами ЦАП на переключателях тока с биполярными транзисторами в качестве ключей являются 12-разрядный 594ПА1 со временем установления 3,5 мкс и погрешностью линейности не более 0,012% и 12-разрядный AD565, имеющий время установления 0,2 мкс при такой же погрешности линейности. Еще более высоким быстродействием обладает AD668, имеющий время установления 90 нс и ту же погрешность линейности. Из новых разработок можно отметить 14-разрядный AD9764 со временем установления 35 нс и погрешностью линейности не более 0,01%.

#### Формирование выходного сигнала в виде напряжения

Существует несколько способов формирования выходного напряжения для ЦАП с суммированием весовых токов. Два из них показаны на рисунке 7.



а) Схема с преобразователем тока в напряжение на операционном усилителе;

б) Последовательность импульсов на выходе ЦАП с ШИМ.

Рисунок 7 – Формирование напряжения по токовому выходу ЦАП

На рисунке 7а приведена схема с преобразователем тока в напряжение на операционном усилителе (ОУ). Эта схема пригодна для всех ЦАП с токовым выходом. Поскольку пленочные резисторы, определяющие весовые токи ЦАП имеют значительный температурный коэффициент сопротивления, резистор обратной связи  $R_{oc}$  следует изготавливать на кристалле ЦАП и в том же технологическом процессе, что обычно и делается. Это позволяет снизить температурную нестабильность преобразователя в 300-400 раз.

Для ЦАП на МОП-ключях выходное напряжение схемы на рисунке 7а:

## Параллельный ЦАП на переключаемых конденсаторах ЦАП с суммированием напряжений

Наиболее общие типы электронных ЦАП:

ЦАП передискретизации, такие, как дельта-сигма-ЦАП, основаны на изменяемой плотности импульсов. Передискретизация позволяет использовать ЦАП с меньшей разрядностью для достижения большей разрядности итогового преобразования; часто дельта-сигма ЦАП строится на основе простейшего однобитного ЦАП, который является практически линейным. На ЦАП малой разрядности поступает импульсный сигнал с модулированной плотностью импульсов (с постоянной длительностью импульса, но с изменяемой скважностью), создаваемый с использованием отрицательной обратной связи. Отрицательная обратная связь выступает в роли фильтра верхних частот для шума квантования.

Большинство ЦАП большой разрядности (более 16 бит) построены на этом принципе вследствие его высокой линейности и низкой стоимости. Быстродействие дельта-сигма ЦАП достигает сотни тысяч отсчётов в секунду, разрядность — до 24 бит. Для генерации сигнала с модулированной плотностью импульсов может быть использован простой дельта-сигма модулятор первого порядка или более высокого порядка как MASH (англ. Multi stage noise SHaping). С увеличением частоты передискретизации смягчаются требования, предъявляемые к выходному фильтру низких частот, и улучшается подавление шума квантования;

ЦАП взвешивающего типа, в котором каждому биту преобразуемого двоичного кода соответствует резистор или источник тока, подключённый на общую точку суммирования. Сила тока источника (проводимость резистора) пропорциональна весу бита, которому он соответствует. Таким образом, все ненулевые биты кода суммируются с весом. Взвешивающий метод один из самых быстрых, но ему свойственна низкая точность из-за необходимости наличия набора множества различных прецизионных источников или резисторов и непостоянного импеданса. По этой причине взвешивающие ЦАП имеют разрядность не более восьми бит;

ЦАП лестничного типа (цепная R-2R-схема). В R-2R-ЦАП значения создаются в специальной схеме, состоящей из резисторов с сопротивлениями R и 2R, называемой матрицей постоянного импеданса, которая имеет два вида включения: прямое — матрица токов и инверсное — матрица напряжений. Применение одинаковых резисторов позволяет существенно улучшить точность по сравнению с обычным взвешивающим ЦАП, так как сравнительно просто изготовить набор прецизионных элементов с

одинаковыми параметрами. ЦАП типа R-2R позволяют отодвинуть ограничения по разрядности. С лазерной подгонкой плёночных резисторов, расположенных на одной подложке гибридной микросхемы, достигается точность 20—22 бита. Основное время на преобразование тратится в операционном усилителе, поэтому он должен иметь максимальное быстродействие. Быстродействие ЦАП единицы микросекунд и ниже (то есть наносекунды). В троичных ЦАП матрица постоянного импеданса состоит из резисторов 3R-4R с терминатором 2R[1].

## Основные типы ЦАП

Основные виды ЦАП:

- взвешивающие – с суммированием взвешенных токов или напряжений, когда каждый разряд входного слова вносит соответствующий своему двоичному весу вклад в общую величину получаемого аналогового сигнала; такие ЦАП называют также параллельными или многоразрядными (multibit).
- Sigma-Delta, по принципу действия обратные АЦП этого же типа. Входной цифровой сигнал подвергается значительной (64х и более) передискретизации и подается на модулятор, формирующий малоразрядные (обычно однобитовые) значения. Полученные в результате малоразрядные отсчеты управляют схемой выдачи эталонных зарядов, которые со столь же высокой частотой добавляются к выходному сигналу.

## Коммутаторы сигналов

*Коммутаторы* аналоговых сигналов – устройства, осуществляющие физическое переключение (коммутацию) связей между различными устройствами. Различают *мультиплексоры* (устройства, способные подключать несколько входов на один выход), *демультиплексоры* (устройства, способные подключать один вход к нескольким выходам) и комбинированные коммутаторы. Существуют также коммутаторы цифровых сигналов – «свитчи».

## Исполнительные устройства

*Исполнительные устройства* – устройства, предназначенные для организации непосредственного воздействия на объект. В качестве исполнительных устройств могут служить шаговый двигатель, электрический нагреватель и т.п.

## Интерфейсы

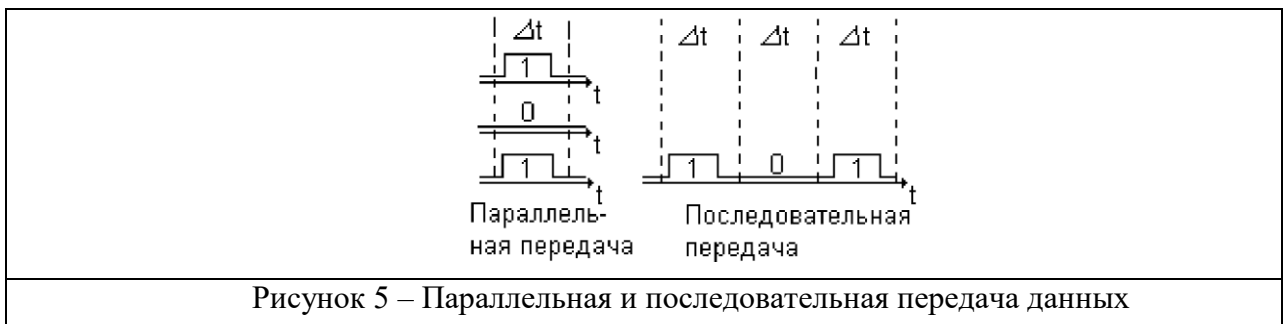
Для передачи электрических сигналов между различными устройствами (например, между датчиком и усилителем или между усилителем и АЦП) используются аналоговые линии связи, т.е. обычные электрические провода и кабели. В случае же, когда необходимо передавать цифровую информацию, используются специальные *интерфейсы* – комплексы программных и аппаратных средств и протоколов (алгоритмов взаимодействия), предназначенных для обеспечения конструктивной, электрической и логической совместимости различных устройств и их компонентов.

Обычно интерфейс (см. рисунок 4) состоит из:

- *шины* (или *магистралей*) – набора электрических линий (проводов), по которым передаются информационные и служебные сигналы;
- *адаптеров* приемника и передатчика – специальных устройств, которые реализуют протоколы обмена информационными и служебными сигналами.



По способу передачи данных по шине интерфейсы можно разделить на *параллельные* и *последовательные* (см. рисунок 5).



Параллельные интерфейсы позволяют передавать элементы информации (например, отдельные биты) независимо друг от друга по разным линиям шины. Теоретически, они обеспечивают высокую скорость передачи данных, но сложнее в реализации и использовании. Однако, практической реализации быстрых параллельных интерфейсов мешает эффект взаимного электрического влияния сигналов, распространяющихся по соседним линиям шины.

Последовательные интерфейсы передают элементы информации один за другим по небольшому числу линий (например, всего по одной линии), – этот вид передачи данных прост и экономичен.

По назначению интерфейсы можно разделить на *внутренние* (или *системные*) – предназначенные для объединения составных частей одного устройства, и *внешние* –

предназначенные для организации информационного обмена между независимыми устройствами.

Среди интерфейсов, используемых в АСУ и СРВ, можно отметить:

- RS-232C
- RS-485/RS-422
- последовательный внешний интерфейс CANbus, часто используемый для организации распределенных бортовых (автомобильных и авиационных) систем управления;
- последовательный внешний интерфейс Industrial Ethernet, являющийся оптимизированной под задачи реального времени модификацией сетевого интерфейса Ethernet;
- комбинированный интерфейс HART, позволяющий одновременно передавать цифровые данные и аналоговые сигналы.

## Контроллеры

В зависимости от сложности реализуемой СРВ подбираются контроллеры и необходимый набор модулей расширения. В качестве контроллеров в СРВ часто используются *программируемые логические контроллеры (ПЛК) – устройства...* Существуют различные варианты исполнения ПЛК.

Контроллеры могут строиться как на базе средств вычислительной техники (ЭВМ с ее стандартными устройствами и интерфейсами) так и специализированных устройств для связи ЭВМ с объектом.

Виды ПЛК:

OMRON, Siemens Simatic S7, Segnetics, Direct Logic, Mitsubishi FX, Modicon TSX Quantum, Beckhof.

ПЛК на базе процессора i8088/8086/80186 (ICPDAS, Advantech).

Интеллектуальные реле (Siemens LOGO!, Mitsubishi Alpha, Zelio Logic, Omron ZEN, Moeller EASY).

Программируемые ПЛК на базе PC-совместимых компьютеров (MicroPC, WinCon).

Распределённые системы управления DCS.

## Автономное исполнение

ПЛК представляют собой комбинированное управляющее и измерительное устройство, сочетающее в себе усилители, АЦП, коммутаторы, микроконтроллеры и пр. Информационная связь с ЭВМ осуществляется посредством одного из стандартных интерфейсов связи (RS-232, RS-485, USB, приборного интерфейса GPIB и т.п.) Также



возможно использование этих интерфейсов для сетевого объединения автономных компонентов друг с другом.

### **Магистрально-модульные системы**

**ПЛК может комплектоваться функциональными модулями расширения, которые подключаются к общей шине ПЛК.**

### **Плата расширения**

Контроллер изготавливаются в виде платы расширения ЭВМ, и подключается к внутреннему системному интерфейсу (ISA, PCI и пр.).

### **Средства вычислительной техники**

Рассмотрим основные классы средств вычислительной техники, применяемые в АСУ и СРВ.

**«Промышленные» ПЭВМ.** Частично решить проблему надежности и устойчивости к неблагоприятным внешним условиям помогает специализированное «инженерное» исполнение, предусматривающее металлический корпус, ударо- и вибростойкое шасси, мощную систему охлаждения, нестандартную компоновку материнских плат и т.п. Типичная промышленная персональная ЭВМ снабжается большим количеством различных сетевых и системных интерфейсов для подключения внешних устройств.

Назначение – сбор данных и управление многими объектами с большим числом точек доступа в масштабах цеха или предприятия; сбор, обработка, визуализация и хранение потоков данных, поступающих из локальных узлов, в качестве которых выступают промышленные контроллеры и микроконтроллеры.

### **Примеры**

Промышленные контроллеры и программируемые логические контроллеры (ПЛК) – полноценные микроЭВМ, которые невелики по размерам, недороги, обладают сравнительно небольшой вычислительной мощностью (тактовая частота процессора – несколько десятков МГц, объем оперативной памяти – до нескольких Мбайт), но развитыми средствами коммуникаций. Обычно, к ним не подключаются ни клавиатура, ни монитор, а весь обмен с оператором идет через имеющиеся интерфейсы (например, через RS-232). Часто промышленные контроллеры выполняются в виде функциональных модулей магистрально-модульных систем. Основное назначение – решение несложных задач сбора и обработки данных и локального управления в масштабе станка, промышленной установки, автономного агрегата и т.п. Типичное применение – работа в качестве одного из узлов сети и/или управляющего модуля магистрально-модульной системы.

### **Примеры**

Цифровые сигнальные процессоры (DSP) и цифровые микроконтроллеры (МК) – компактные и дешевые устройства, предназначенные для решения несложных типовых

задач автоматизации управления во встроенных и бортовых системах. DSP и МК часто выполняются в виде одной микросхемы (или в виде «чипсета» – комплекта микросхем), интегрирующей в себе ряд устройств: АЛУ, ОЗУ, ПЗУ для хранения программ, АЦП, ЦАП, простой интерфейс передачи данных и т.п. Основное отличие МК от DSP заключается в том, что DSP проблемно-ориентированы, в их системе команд присутствуют специализированные машинные команды, реализующие алгоритмы цифровой обработки сигналов; МК более универсальны.

### Примеры

### Вопросы для самоконтроля:

- 1) Сигнал на выходе датчика изменяется в пределах  $\pm 1\text{В}$ , а АЦП рассчитан на диапазон  $\pm 7.5\text{В}$ . Предложите схему усилителя и номиналы резисторов.
- 2) Пределы измерения АЦП составляют  $\pm 5\text{В}$ , разрядность – 8 бит. Какова погрешность дискретизации в вольтах? В процентах?
- 3) Время преобразования АЦП составляет 22.7 мкс. Какова максимальная частота дискретизации сигнала, которую можно достичь с этим АЦП?
- 4) Данные по интерфейсу RS-232 передаются пакетами, состоящими из одного стартового, 8 информационных и одного стопового бита со скоростью 115 кбит/с. Какова продолжительность передачи одного бита? Одного пакета?

### Список использованных источников

- 1) Системы реального времени: обзорный курс лекций / К.Е. Климентьев. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 2008. – 45 с.

