

# ЛЕКЦИИ ЭПУ

## ГЛАВА 1 Введение в электронные промышленные устройства

**Типы и назначение электронных промышленных устройств; их роль в промышленной автоматизации. Информационные характеристики электронных устройств.**

**Классификация электронных промышленных устройств. Задачи курса «Электронные промышленные устройства».**

**Электроника** охватывает обширный раздел науки и техники, связанный с изучением и использованием различных физических явлений, а также разработкой и применением приборов и устройств, основанных на протекании электрического тока в вакууме, газе и твердом теле. Такими приборами являются *полупроводниковые* (протекание тока в твердом теле), *электронные* (протекание тока в вакууме) и *ионные* (протекание тока в газе) приборы. Главное место среди них в настоящее время занимают полупроводниковые приборы. Общим свойством всех названных приборов является то, что они являются существенно *нелинейными элементами*, нелинейность их вольт-амперных характеристик, как правило, является признаком, определяющим важнейшие их свойства.

**Промышленная электроника** — это часть электроники, занимающаяся применением полупроводниковых, электронных и ионных приборов в промышленности. Несмотря на различие областей применения и многообразие режимов работы промышленных электронных устройств, они строятся на основе общих принципов и состоят из ограниченного числа функциональных узлов. Общие принципы построения этих функциональных узлов — электронных схем — и рассматривает промышленная электроника.

В свою очередь, в промышленную электронику, обеспечивающую разнообразные виды техники электронными устройствами измерения, контроля, управления и защиты, а также электронными системами преобразования электрической энергии, входят:

1) **информационная электроника**, к которой относятся электронные системы и устройства, связанные с измерением, контролем и управлением промышленными объектами и технологическими процессами, а также с передачей, обработкой и отображением информации. Усилители сигналов, генераторы напряжений различной формы, логические схемы, счетчики, индикаторные устройства и дисплеи вычислительных машин — все это устройства информационной электроники. Характерными чертами современной информационной электроники являются сложность и многообразие решаемых задач, высокое быстродействие и надежность. Информационная электроника в настоящее время неразрывно связана с применением интегральных микросхем, развитие и совершенствование которых в главной мере определяет уровень развития этой отрасли электронной техники;

2) **энергетическая электроника (преобразовательная техника)**, связанная с преобразованием вида электрического тока для целей электропривода, электрической тяги, электротермии, электротехнологий, электроэнергетики и т. д. Почти половина производимой электроэнергии потребляется в виде постоянного тока или тока нестандартной частоты. Большая часть

преобразований электрической энергии в настоящее время выполняется полупроводниковыми преобразователями. Основными видами преобразователей являются выпрямители (преобразование переменного тока в постоянный), инверторы (преобразование постоянного тока в переменный), преобразователи частоты, регулируемые преобразователи постоянного и переменного напряжений.

Развитие электроэнергетики и электротехники тесно связано с электроникой. Сложность процессов в энергосистемах, высокая скорость их протекания потребовали широкого внедрения для расчета режимов и управления процессами электронных вычислительных машин (ЭВМ), связанных с системой сложными электронными устройствами и снабженных развитыми устройствами для отображения информации. Основные процессы производства автоматизируются на основе современных устройств информационной электроники, в которых в последние годы широко применяются интегральные микросхемы и микропроцессоры. Не менее тесно связана с энергетикой и электромеханикой энергетическая электроника. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии являются одними из основных нагрузочных элементов сетей, их работа во многом определяет режимы работы сетей. Вентильные преобразователи используются для питания электроприводов и электротехнологических установок, для возбуждения синхронных электрических машин и в схемах частотного пуска гидрогенераторов. На основе полупроводниковых вентильных преобразователей созданы линии электропередач постоянного тока большой мощности и вставки постоянного тока.

Таким образом, электронные устройства являются важными и весьма сложными компонентами энергетических и электромеханических установок и систем, и для их создания необходимо привлекать специалистов в области промышленной электроники, автоматики и вычислительной техники. Однако инженеры, специализирующиеся в области электроэнергетики и электротехники, не могут устраниться от решения вопросов, связанных с электроникой. Во-первых, они должны уметь четко сформулировать задачу для разработчика электронных схем и представлять те трудности, с которыми может столкнуться разработчик. Не полно заданные требования могут привести к созданию неработоспособного устройства, а неоправданное завышение требований — к повышению стоимости и снижению надежности электронного оборудования. Для того чтобы говорить с разработчиком электронной аппаратуры на одном языке, надо отчетливо представлять себе, что может выполнить электроника и какой ценой и какими способами это достигается. Последнее необходимо также для квалифицированного выбора оборудования, выпускаемого промышленностью.

Во-вторых, возникает необходимость грамотной эксплуатации электронных устройств. В-третьих, инженеры-электрики принимают активное участие в работах по монтажу и наладке оборудования, в том числе электроники. В-четвертых, проектирование ряда энергетических установок, в том числе линий передач постоянного тока, требует совместной работы специалистов по энергетике и преобразовательной технике.

Все это требует больших знаний в области промышленной электроники. Основу этих знаний закладывает изучение курса «Электронные промышленные устройства». В нем изложены сведения о современных функциональных узлах схемах информационной и энергетической электроники. Курс поможет принятию грамотных решений в инженерной практике. Для сохранения и постоянного повышения своей инженерной квалификации инженер должен регулярно следить за научной литературой. Особенno это касается такой бурно изменяющейся области, как промышленная электроника. Инженер должен сознавать ограниченность своих знаний и не пытаться принимать решений в той области,

где его компетенция ограничена. Поэтому одной из задач курса является подготовка к чтению специальной литературы в области схемотехнической электроники.

Многие важнейшие проблемы науки и техники возникают на стыках наук. Электроника, электротехника и энергетика ныне соприкасаются очень близко, требуют совместной работы ученых и инженеров, больших знаний в смежных областях.

Электронная техника непрерывно развивается, каждую задачу можно решить на основе различных схемных вариантов: можно построить схему на дискретных компонентах, можно выполнить ее на интегральных микросхемах, применить микропроцессорный комплект, провести обработку информации в цифровом или аналоговом виде. Какое решение выбрать? В конечном счете, все решает экономический анализ, и принятие неверного решения (скажем, отказ от использования микросхем) может не помешать решению локальной технической задачи, но в итоге окажется убыточным для народного хозяйства: увеличится стоимость оборудования, или возрастет стоимость его эксплуатации, или уменьшится срок службы. Почти каждый инженер на своем месте воздействует на техническую политику в своей области и при разработке и отстаивании технических решений должен выступать не только как специалист, но и как гражданин.

## 1.2 Информационные характеристики электронных устройств

Информационными характеристиками электронных устройств управления будем называть характеристики, с помощью которых определяется качество передачи информации по каналам связи и управления.

К информационным характеристикам относятся скорость передачи информации, пропускная способность канала связи, количество передаваемой информации, помехоустойчивость, полоса пропускания частот, уровень превышение сигнала над помехами.

Процесс передачи информации можно характеризовать количеством информации, передаваемым в единицу времени по каналу связи (управления). При этом под каналом связи (управления)  $K$  будем понимать линию связи, соединяющую источник сигнала (передатчик)  $X$  получатель сигнала (приемник)  $Y$ .

Скорость передачи информации определяется формулой

$$V_u = \frac{I}{T},$$

где  $I$ —количество передаваемой информации, бит,  $T$  — время передачи информации, с.

При отсутствии помех в канале количество информации в сообщениях источника с учетом его энтропии

$$I = nH,$$

где  $n$ — число символов в сообщении. В этом случае скорость передачи будет:

$$V_u = \frac{H}{\tau_c},$$

так как  $T=n\tau_c$ , где  $\tau_c$  — средняя длительность передачи символа источником сообщений.

Требование высокой скорости передачи информации является одним из основных требований, предъявляемых к системам передачи информации. Однако скорость  $V_u$  не

может беспрепятственно повышаться, поскольку она ограничивается величиной энтропии, с одной стороны, и длительностью передачи символов  $\tau_c$ , с другой стороны.

Так как максимум энтропии источника сообщений определяется числом состояний

$$H_{\text{МАКС}} = \log L,$$

где  $L$  — число равновероятных возможных сообщений, а длительность символа ограничивается, в свою очередь, полосой пропускания канала, то максимальная возможная скорость передачи информации по каналу связи ограничивается пропускной способностью канала:

$$C = \max V_H = \max_{T \rightarrow \infty} \frac{I}{T} = \max \frac{H}{\tau_c}.$$

При этом пропускной способностью канала будем называть наибольшее количество информации, которое способен передать канал в единицу времени без искажений.

Справедливость выражения устанавливается первой теоремой Шеннона: «Если пропускная способность канала связи  $C$  больше энтропии источника информации в единицу времени, т. е.  $C > H(X)$ , то всегда можно закодировать достаточно длинное сообщение так, чтобы оно передавалось без искажений и без задержки. Если же  $C < H(X)$ , то передача информации без задержек невозможна».

Максимальное количество информации, которое может быть передано по каналу связи, определяется формулой

$$I_{\text{МАКС}} = F_B \cdot T \cdot \log \left( 1 + \frac{P_c}{P_n} \right),$$

где  $P_c/P_n$  — отношение мощности сигнала  $P_c$  мощности помех  $P_n$ ;  $T$  — время, затраченное на передачу информации (общая длительность сообщений);  $F_B$  — верхняя (гранична) частота передаваемого сообщения, величина которой устанавливается на основании теоремы Котельникова.

Произведение  $F_B T \log (1 + P_c/P_n)$  называется объемом сообщения  $\Phi_c$ .

С учетом (1.13) выражение для пропускной способности канала можно представить в виде:

Помехоустойчивость устройства управления определяет способность передачи (приема) информации без заметных искажений при наличии помех. Количественная оценка помехоустойчивости системы передачи информации может быть сделана по степени соответствия принимаемых сообщений переданным в заданных условиях приема.

В общем случае помехоустойчивость информационных устройств управления оценивается с помощью аппарата теории случайных функций.

Надёжность передачи информации определяется точностью и достоверностью информации, принятой получателем без задержек и без искажений. Для оценки точности и достоверности принятой получателем информации необходимо также использовать математический аппарат теории случайных функций и методы математического моделирования.

## ГЛАВА 2 Основы теории информации и сигналов

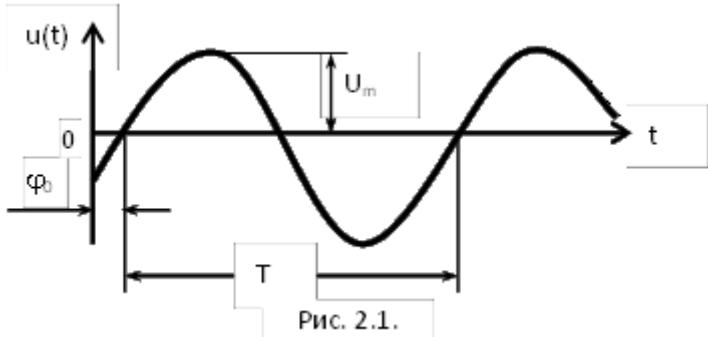
### 2.1 СИГНАЛЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТРОЙСТВАХ

Так как сообщение предполагает изменение состояния источника, сигнал также должен иметь какой-то один или группу параметров, подвергающихся изменению. Сигнал, в котором ничего не меняется, не может нести информации. Показания прибора становятся информативными только при их изменении. Так, сейсмограф привлекает внимание лишь тогда, когда он после длительной паузы свидетельствует о толчке.

В зависимости от того, какой исходной (априорной) информацией о свойствах источника и характере протекания сигнала во времени мы располагаем, принято разделять сигналы на детерминированные и случайные.

Детерминированными считаются такие сигналы, поведение которых можно предсказать заранее с приемлемой точностью. В свою очередь, детерминированные сигналы делятся на периодические и непериодические. Наиболее распространенным примером периодического сигнала является гармоническое колебание. Допустим, что генератор вырабатывает синусоидальное напряжение с амплитудой  $U_m$ , частотой  $w_0$  и начальной фазой  $\varphi_0$ . Тогда мгновенное значение напряжения на выходе такого генератора в любой момент времени описывается выражением:

$$u(t) = U_m \sin(w_0 t + \varphi_0)$$



где  $w_0 = 2\pi/T$ . Временная диаграмма такого сигнала представлена на рис.2.1.

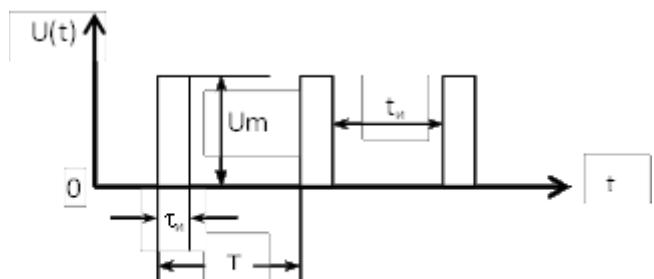


Рис. 2.2

Кроме гармонических колебаний, в качестве периодических сигналов могут быть использованы сигналы прямоугольной формы (рис.2.2). Сигналы прямоугольной формы характеризуются следующими параметрами: амплитудой импульса  $U_m$ , периодом  $T$  длительностью импульса  $t_{il}$  и длительностью паузы  $t_{ip}$ . Такой сигнал также может быть описан математическим выражением.

Таким образом, любой детерминированный сигнал может быть задан своей математической моделью — описанием в виде некоторой, вполне определенной функции времени, что облегчает анализ различных свойств сигнала и способов его преобразования.

Случайными называют сигналы, которые, в отличие от детерминированных, нельзя предсказать с достаточно малой погрешностью.

Любой сигнал может быть представлен в двух математических формах – временной и частотной.

Представление сигнала во временной области позволяет определить такие его параметры, как форму, энергию, мощность и длительность.

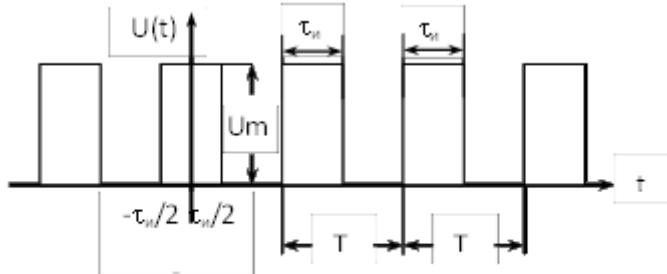
Для гармонического сигнала  $u(t) = U_m \sin(\omega_0 t + j_0)$  амплитудный спектр представляется одной линией (рис.2.3).

Периодическая функция произвольного вида, удовлетворявшая условиям Дирихле, может быть представлена рядом

$$u(t) = \frac{U_m}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} U_i \sin(i \cdot \omega_1 \cdot t + \varphi_i),$$

где  $U_m/2$  – постоянная составляющая,  $U_i$ ,  $i\omega_1$  и  $j_i$  – соответственно амплитуда, угловая частота и начальная фаза  $i$ -й гармоники.

Амплитудный спектр периодического сигнала является линейчатым (дискретным) и гармоническим.



Периодический импульсный сигнал, изображенный на рис.2.4, описывается выражением:

$$U(t) = \begin{cases} U_m, & \text{при } -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2}; \\ 0, & \text{при } \frac{T}{2} < t < T - \frac{T}{2}. \end{cases}$$

На рис. 2.5 приведен график амплитудного частотного спектра исследуемого сигнала для  $\tau_n/T = 1/2$  (по оси ординат отложены относительные значения амплитуд гармоник  $U_i/U_m$ ).

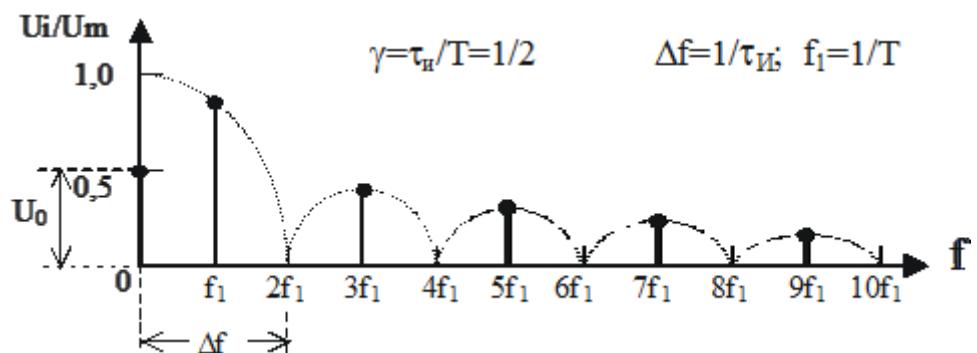


Рис. 2.5.

Частотный спектр непериодического сигнала формально можно получить из спектра соответствующего периодического сигнала, принимая  $T \rightarrow \infty$ . В этом случае разность

частот между двумя соседними гармониками  $f_1=1/T$  стремится к нулю, т. е. частотный спектр из дискретного (линейчатого) становится непрерывным (сплошным).

## Модуляция сигналов

Передача сообщений по каналу связи осуществляется с помощью некоторых физических процессов, которые называются переносчиками. В качестве переносчиков обычно используются гармонические колебания или импульсные последовательности. Нанесение информации напереносчик осуществляется путем модуляции — изменения его некоторых параметров в соответствии с передаваемым сообщением. Немодулированный переносчик информации не несет. Передаваемое сообщение может воздействовать на любой параметр переносчика. При данном виде переносчика число возможных видов модуляции определяется числом его параметров.

Модуляцией называется процесс принудительного управления одним или несколькими параметрами высокочастотного колебания (переносчика) в соответствии с законом изменения низкочастотного сигнала (сообщения).

В некоторых случаях параметры переносчика изменяются под действием модулирующей дискретной последовательности и принимают дискретные значения. Такой процесс называют манипуляцией в отличие от модуляции, при которой параметры переносчика изменяются непрерывно.

Если в качестве переносчика выбрано синусоидальное высокочастотное колебание, то реализуется аналоговая модуляция.

Если в качестве переносчика используется периодическая последовательность импульсов, основными параметрами которой являются амплитуда импульсов, длительность импульсов, их временное положение и частота следования, то можно получить следующие виды модуляции: амплитудно-импульсную (АИМ), широтно-импульсную (ШИМ), фазо-импульсную (ФИМ) и частотно-импульсную (ЧИМ). Следует иметь в виду, что импульсные способы модуляции не используются для передачи информации на большие расстояния. Поэтому когда говорят о системах с импульсной модуляцией, то имеется в виду двойная модуляция, т. е. модуляция импульсной последовательности исходным сообщением, а затем модуляция высокочастотного гармонического колебания импульсной последовательностью.

Обратные операции по восстановлению величин, вызвавших изменение параметров переносчика при модуляции, называются демодуляцией.

Как модуляция, так и демодуляция являются нелинейными преобразованиями и осуществляются с помощью нелинейных устройств.

### Виды аналоговой модуляции

Если в качестве переносчика выбрано синусоидальное высокочастотное колебание

$$f(t) = A_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1)$$

то, воздействуя на его параметры — амплитуду, фазу и частоту, можно получить соответственно амплитудную, фазовую и частотную модуляцию.

При амплитудной модуляции (*AM*) амплитуда сигнала-переносчика изменяется согласно выражению:

$$A = A_0 + \Delta A x(t),$$

где  $x(t)$  — передаваемый сигнал-сообщение.

При фазовой модуляции (*FM*) фаза сигнала-переносчика изменяется согласно выражению:

$$\varphi = \varphi_0 + \Delta \varphi \cdot x(t)$$

При частотной модуляции (*ЧМ*) частота сигнала-переносчика изменяется согласно выражению:

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega \cdot x(t)$$

При амплитудной модуляции (АМ) модулированный сигнал описывается выражением

$$S_{AM}(t) = S_m(t) \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (2)$$

где  $S_m(t)$  — амплитуда модулированного сигнала.

Предположим, что модулирующий сигнал (сообщение) представляет собой гармоническую функцию:

$$X(t) = X_m \sin(Wt), \quad (3)$$

где  $W$  — частота модулирующего сигнала. Тогда амплитуда модулированного сигнала  $S_m(t)$  будет изменяться по закону:

$$S_m(t) = A_0 + D \cdot A_m \cdot \sin(Wt).$$

Процесс амплитудной модуляции сигнала иллюстрируется рис. 2.6, на котором сигналы  $f(t)$ ,  $S(t)$ ,  $X(t)$  соответственно представлены выражениями (1), (2), (3).

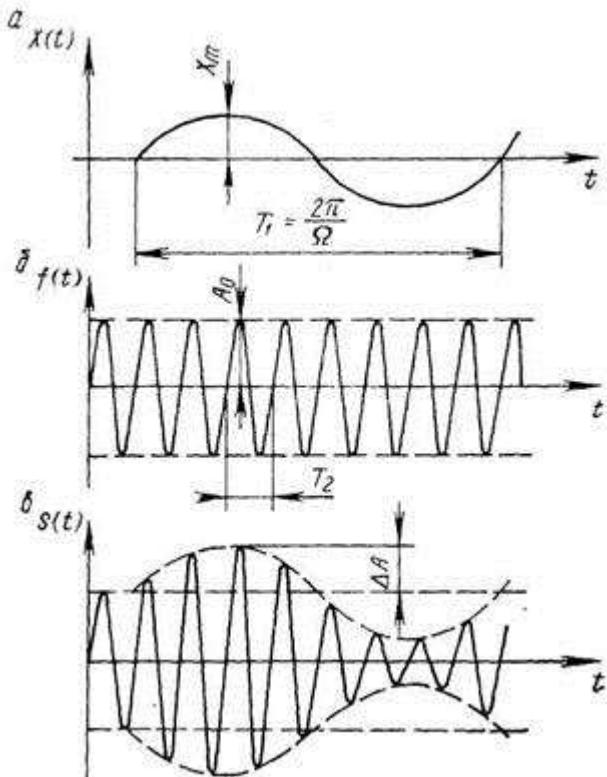


Рис. 2.6. Сигналы: *a* — модулирующий (сигнал сообщения); *б* — высокочастотный сигнал (переносчик); *в* — амплитудно-модулированный сигнал.

При амплитудной модуляции происходит перенос спектра сообщения на частоту  $W$ . Частоты  $(\omega_0 + W)$  и  $(\omega_0 - W)$  называются соответственно верхней и нижней боковыми частотами. Ширина полосы частот, занимаемая АМ-колебанием, равна  $2W$ , т. е. ширина спектра АМ-сигнала в два раза шире спектра сообщения.

При частотной модуляции (ЧМ) по закону модулирующего сигнала  $X(t)$  изменяется мгновенное значение частоты  $w(t)$  высокочастотного колебания  $f(t)$ .

$$\omega(t) = \omega_0 + k_{CM} \cdot X(t) = \omega_0 + k_{CM} X_m \sin(\Omega t),$$

где  $k_{CM}$  — коэффициент пропорциональности.

Процессы при частотной модуляции иллюстрируются рис. 2.7, на котором функции  $X(t)$ ,  $w(t)$ ,  $S_{CM}(t)$  определяют законы изменения модулирующего сигнала, частоты несущего сигнала и частотно-модулированного колебания соответственно.

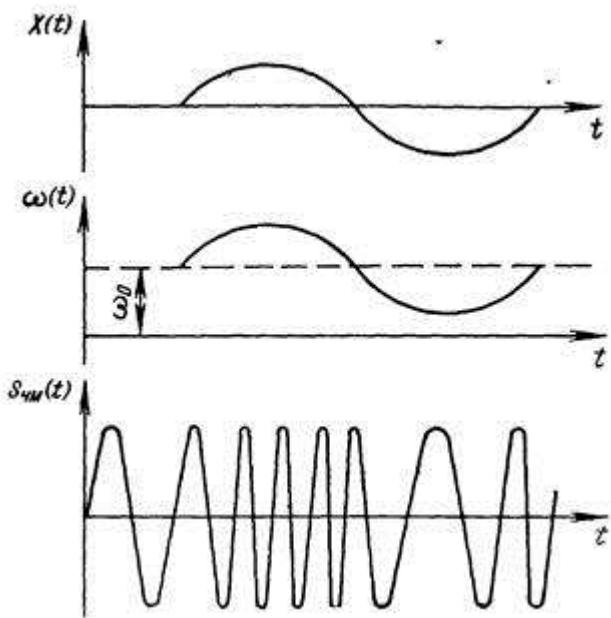


Рис 2.7. ЧМ-колебание

При фазовой модуляции (ФМ) фаза высокочастотного (модулированного) сигнала будет изменяться по закону модулирующего сигнала (сообщения).

#### Дискретизация, квантование и кодирование сигналов

Современные цифровые технологии, обладая неограниченными возможностями по обработке, передаче и хранению больших объемов информации, всё активнее внедряются в самые разные сферы человеческой деятельности, даже в те из них, где прежде традиционно господствовали аналоговые. Однако все известные физические явления и процессы, которые служат источниками исходных данных для решения вычислительных задач, являются непрерывными аналоговыми величинами. Поэтому, прежде чем произвести какое-либо вычисление, надо получить численные значения величин, над которыми производятся вычислительные операции, т. е. осуществить преобразование аналоговой величины в соответствующий ей цифровой эквивалент. И точность такого преобразования должна быть не хуже желаемой точности результата. Кроме того, нередко результат вычисления также должен быть представлен в виде аналоговой величины с высокой степенью точности.

Еще одним аргументом в пользу цифрового представления аналоговой информации является возможность сохранения последней в неизменном виде в течение практически неограниченного времени. Многие из аналоговых процессов быстротечны и не повторяются вновь, фиксация их аналоговыми методами — записью на какой-нибудь носитель — фотопленку или магнитную ленту, недостаточно надежна и имеет свойство со временем ухудшаться — вплоть до полного разрушения. Цифровые же методы подобными недостатками не страдают, поскольку запись производится всего двумя символами — «единицей» (есть сигнал) и «нулем» (сигнала нет). В таком виде информация неизмеримо более устойчива к воздействию разного рода искажающих факторов. Нет необходимости заботиться о точной форме импульса — достаточно, чтобы он был вообще. К тому же разработанные на сегодняшний день алгоритмы защиты цифровой информации от ошибок позволяют практически свести к нулю результат любого искажающего воздействия, такого, которое для аналоговой информации было бы равносильно ее безвозвратной утрате.

По указанным выше причинам роль приборов, преобразующих аналоговые величины в цифровые и обратно — аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей (АЦП и

ЦАП) становится чрезвычайно значимой, поскольку им отводится роль своего рода «посредников», между аналоговой природой окружающего нас мира и вычислительной мощью «цифрового мира». Роль эта весьма ответственна. Какова точность преобразования, такова будет и точность результата.

В самом общем случае такие сигналы можно разделить на четыре класса:

1. произвольные по величине и непрерывные по времени;
2. произвольные по величине и дискретные во времени;
3. квантованные по величине и непрерывные по времени;
- 4.

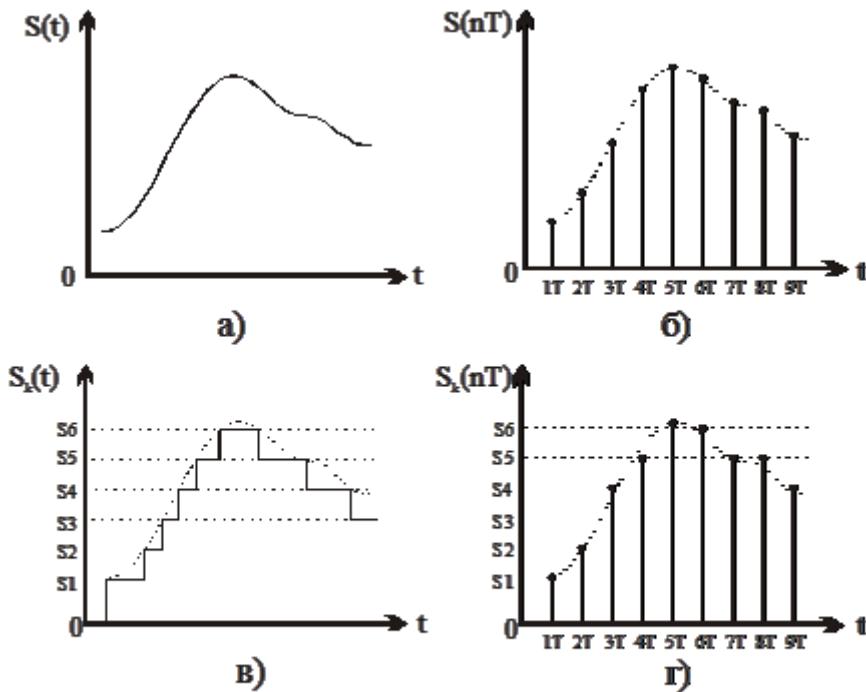


Рис. 2.1.12

квантованные по величине и дискретные по времени (рис. 2.1.12 д).

Сигнал  $s(t)$ , показанный на рис. а называется *аналоговым*, поскольку его можно толковать как электрическое отображение реальных физических процессов.

Сигнал  $S(nT)$ , показанный на рис. б, также, как и аналоговый, может принимать любые значения по оси ординат, но по оси времени он определен только для некоторых фиксированных точек, т. е. является функцией дискретной переменной  $(nT)$ , где  $n = 0, 1, 2 \dots, aT$  — интервал дискретизации. Такой сигнал называется *дискретным*, причем в данном случае термин «дискретный» характеризует не сам сигнал, а способ его задания на временной оси.

Сигнал, показанный на рис. в, задан на всей временной оси, однако величина его может принимать только дискретные значения. В подобном случае говорят о сигнале, квантованном по уровню.

*Квантование* используют в том случае, когда необходимо преобразовать сигнал в цифровую форму. Для этого весь диапазон изменения величины сигнала разбивают на счетное число уровней и каждому уровню присваивают определенный номер, который затем кодируют двоичным кодом с конечным числом разрядов. Величина сигнала измеряется в заданных точках на оси времени. Такой сигнал — дискретный по времени и квантованный по уровню, называется *цифровым*. Он показан на рис. г.

Уровни квантования образуются путем разбиения всего диапазона, в котором изменяется аналоговый сигнал, на ряд участков, каждому из которых присваивается

определенный номер. Эти номера кодируются заранее выбранным кодом. Поскольку цифровые системы оперируют с двоичными числами, т. е. числами, выражающимися в виде поразрядных комбинаций всего двух цифр — «нuleй» («0») и «единиц» («1»), то номера уровней квантования также кодируются двоичным кодом, а их число  $L$  выбирается равным  $2^n$ , где  $n$  – количество разрядов двоичного числа.

Если сигнал однополярный, то все двоичные коды  $2^n$  уровней будут выражать положительные значения аналогового сигнала.

Очевидно, что единственным способом уменьшения погрешности квантования является увеличение числа разрядов кода, которым обозначаются уровни квантования. Каждое увеличение разрядности кода на единицу вдвое увеличивает число уровней квантования и, следовательно, вдвое уменьшает погрешность квантования. Но какой бы высокой ни была разрядность кода, погрешность квантования всегда будет присутствовать.

## ГЛАВА 3 Проектирование цифровых схем

**Соотношения алгебры логики; логические функции и их преобразование; методы минимизации логических функций.**

### 3.1 Законы алгебры логики

Законы алгебры логики базируются на аксиомах и позволяют преобразовывать логические функции. Логические функции преобразуются с целью их упрощения, а это ведет к упрощению цифровой схемы.

АКСИОМЫ алгебры логики описывают действие логических функций "И" и "ИЛИ" и записываются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} 0 * 0 &= 0 \\ 0 * 1 &= 0 \\ 1 * 0 &= 0 \\ 1 * 1 &= 1 \end{aligned}$$
$$\begin{aligned} 0 + 0 &= 0 \\ 0 + 1 &= 1 \\ 1 + 0 &= 1 \\ 1 + 1 &= 1 \end{aligned}$$

Всего имеется пять законов алгебры логики:

#### 3.1.1 Закон одинарных элементов

$$1 * X = X \\ 0 * X = 0 \\ X * X = X$$

Этот закон непосредственно следует из приведённых выше выражений аксиом алгебры логики.

Верхние два выражения могут быть полезны при построении коммутаторов, ведь подавая на один из входов элемента “2И” логический ноль или единицу можно либо пропускать сигнал на выход, либо формировать на выходе нулевой потенциал.

Второй вариант использования этих выражений заключается в возможности избирательного обнуления определённых разрядов многоразрядного числа. При поразрядном применении операции "И" можно либо оставлять прежнее значение разряда, либо обнулять его, подавая на соответствующие разряды единичный или нулевой потенциал. Например, требуется обнулить 6, 3 и 1 разряды. Тогда:

$$\begin{array}{r}
 11010111 \\
 ^\wedge 10110101 \\
 \hline
 10010101
 \end{array}$$

В приведённом примере отчётливо видно, что для обнуления необходимых разрядов в маске (нижнее число) на месте соответствующих разрядов записаны нули, в остальных разрядах записаны единицы. В исходном числе (верхнее число) на месте 6 и 1 разрядов находятся единицы. После выполнения операции "И" на этих местах появляются нули. На месте третьего разряда в исходном числе находится ноль. В результирующем числе на этом месте тоже присутствует ноль. Остальные разряды, как и требовалось по условию задачи, не изменены.

Точно так же можно записывать единицы в нужные нам разряды. В этом случае необходимо воспользоваться нижними двумя выражениями закона одинарных элементов. При поразрядном применении операции "ИЛИ" можно либо оставлять прежнее значение разряда, либо обнулять его, подавая на соответствующие разряды нулевой или единичный потенциал. Пусть требуется записать единицы в 7 и 6 биты числа. Тогда:

$$\begin{array}{r}
 01010111 \\
 \vee 11000000 \\
 \hline
 11010111
 \end{array}$$

Здесь в маску (нижнее число) мы записали единицы в седьмой и шестой биты. Остальные биты содержат нули, и, следовательно, не могут изменить первоначальное состояние исходного числа, что мы и видим в результирующем числе под чертой.

### 3.1.2. Законы отрицания

#### a. Закон дополнительных элементов

$$x + \bar{x} = 1 \quad x \cdot \bar{x} = 0$$

Выражения этого закона широко используется для минимизации логических схем. Если удаётся выделить из общего выражения логической функции такие подвыражения, то можно сократить необходимое количество входов элементов цифровой схемы, а иногда и вообще свести всё выражение к логической константе.

#### б. Двойное отрицание

$$\overline{\overline{1}} = 0 \quad \overline{\overline{0}} = 1 \quad \overline{\overline{x}} = x$$

#### с. Закон отрицательной логики

$$\begin{array}{l}
 \overline{\overline{a} + \overline{b} + \overline{c}} = a \cdot b \cdot c \\
 \overline{\overline{a} \cdot \overline{b} \cdot \overline{c}} = a + b + c
 \end{array}$$

Закон отрицательной логики справедлив для любого числа переменных. Этот закон позволяет реализовывать [логическую функцию "И"](#) при помощи логических элементов "ИЛИ" и наоборот: реализовывать логическую функцию "ИЛИ" при помощи логических

элементов "И". Это особенно полезно в ТТЛ схемотехнике, так как там легко реализовать логические элементы "И", но при этом достаточно сложно логические элементы "ИЛИ". Благодаря закону отрицательной логики можно реализовывать элементы "ИЛИ" на логических элементах "И".

### 3.1.3. Комбинационные законы

Комбинационные законы алгебры логики во многом соответствуют комбинационным законам обычной алгебры, но есть и отличия.

#### a. закон тавтологии (многократное повторение)

$$\begin{aligned} X + X + X + X &= X \\ X * X * X * X &= X \end{aligned}$$

Этот закон позволяет использовать логические элементы с большим количеством входов в качестве логических элементов с меньшим количеством входов.

Однако следует предупредить, что объединение нескольких входов увеличивает входные токи логического элемента и его ёмкость, что увеличивает ток потребления предыдущих элементов и отрицательно сказывается на быстродействии цифровой схемы в целом.

Для уменьшения числа входов в логическом элементе лучше воспользоваться законом одинарных элементов, как это было показано выше.

#### б. закон переместительности

$$A + B + C + D = A + C + B + D$$

#### с. закон сочетательности

$$A + B + C + D = A + (B + C) + D = A + B + (C + D)$$

#### д. закон распределительности

$$\begin{aligned} XI(X2 + X3) &= XI X2 + XI X3 XI + X2 X3 = (XI + X2)(XI + X3) = \text{/докажем это путём} \\ &\quad \text{раскрытия скобок/} \\ &= XI XI + XI X3 + XI X2 + X2 X3 = XI(1 + X3 + X2) + X2 X3 = XI + X2 X3 \end{aligned} =$$

### 3.1.4. Правило поглощения (одна переменная поглощает другие)

$$XI + XI X2 X3 = XI(1 + X2 X3) = XI$$

### 3.1.5. Правило склеивания (выполняется только по одной переменной)

$$A\bar{B}C + ABC = AC(\underbrace{\bar{B} + B}_1) = AC$$

## ЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ

## **Понятие о логической функции и логическом устройстве.**

Для обозначение различных предметов, понятий, действий пользуются словами. Слова строятся из букв, которые берутся из некоторого набора их, называемого алфавитом.

В цифровой технике для тех же целей пользуются *кодовыми словами*. Особенность этих слов состоит в том, что все они имеют одинаковую длину (т.е. представляют собой последовательность букв одинаковой длины) и для их построения используется простейший алфавит, состоящий лишь из двух букв. Эти буквы принято обозначать символами 0 и 1. Таким образом, кодовое слово в цифровой технике есть последовательность символов 0 и 1 определенной длины, например 10111011. Такими словами могут представляться и числа, в этом случае 0 и 1 совпадают по смыслу с обычными арабскими цифрами. При представлении кодовым словом некоторой нечисловой информации, чтобы отличать буквы 0 и 1 от цифр, будем эти буквы называть соответственно *логическим нулем и логической единицей*.

Если длина кодовых слов составляет  $n$  разрядов, то можно построить  $2^n$  различных комбинаций - кодовых слов. Например при  $n=3$  можно построить  $2^3=8$  слов: 000, 001, 011, 100, 101, 110, 111.

Информация, которая передается между отдельными узлами (блоками) сложного цифрового устройства, представляется в виде кодовых слов. Таким образом, на входы каждого узла образуется новое кодовое слово, представляющее собой результат обработки входных слов. Выходное слово зависит от того, какие слова поступают на входы узла. Поэтому можно говорить, что выходное слово есть функция, для которыми аргументами являются входные слова. Для того, чтобы подчеркнуть особенности таких функций, состоящую в том, что сама функция и ее аргументы могут принимать значения *логического нуля и логической единицы*, будем эти функции называть *функциями алгебры логики (ФАЛ)*.

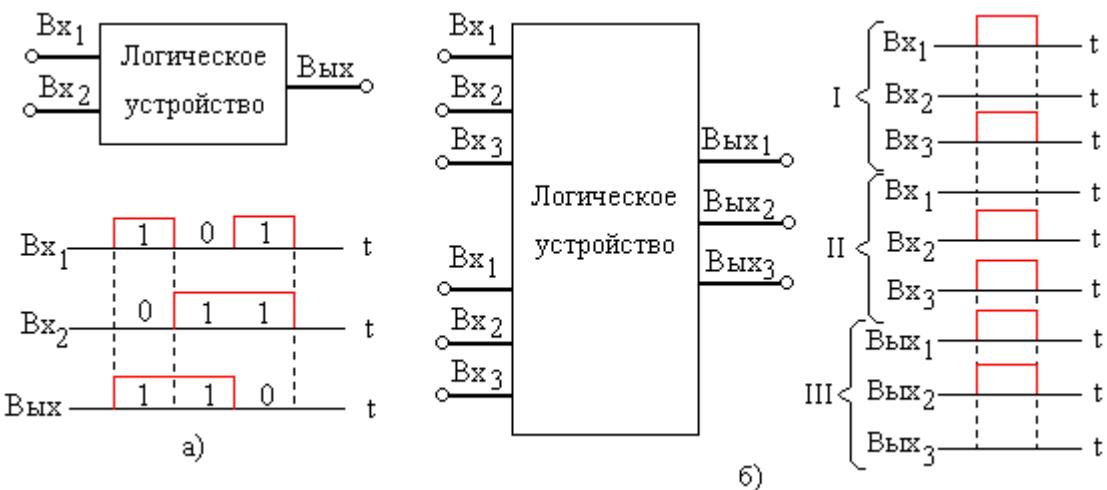
Устройства, предназначенные для формирования функций алгебры логики, в дальнейшем будем называть *логическими устройствами или цифровыми устройствами*.

Цифровые устройства (либо их узлы) можно делить на типы по различным признакам.

По способу ввода и вывода кодовых слов различают логические устройства последовательного, параллельного и смешанного действия.

На входы *устройства последовательного действия* символы кодовых слов поступают не одновременно, а последовательно, символ за символом (в так называемой *последовательной форме*). Пример такого устройства показан на рисунке 3.1,а.

На входы *устройства параллельного действия* все  $n$  символов каждого входного кодового слова подаются одновременно (в так называемый *параллельной форме*). В такой же форме образуется на выходе выходное слово. Очевидно, при параллельной форме приема и передачи кодовых слов в устройстве необходимо иметь для каждого разряда входного (выходного) слова отдельный вход (выход).



Пример такого устройства показан 3.1,б. Устройство выполняет над разрядами входных слов ту же логическую операцию (выявляя несовпадение символов соответствующих разрядов входных слов), что и устройство, показанное на рисунке 3.1,а, но в параллельной форме. Входы устройства разделены на две группы (I и II), каждая из которых предназначена для приема трехразрядного входного кодового слова в параллельной форме. На выходах устройства также в параллельной форме получается трехразрядное выходное слово.

В *устройствах смешанного действия* входные и выходные кодовые слова представляются в разных формах. Например, входные слова - в последовательной форме, выходные - в параллельной. Устройства смешанного действия могут использоваться для преобразования кодовых слов из одной формы представления в другую (из последовательной формы в параллельную и наоборот).

По способу функционирования логические устройства (и их схемы) делятся на два класса: комбинационные устройства (и соответственно комбинационные схемы) и последовательностные устройства (последовательностные схемы).

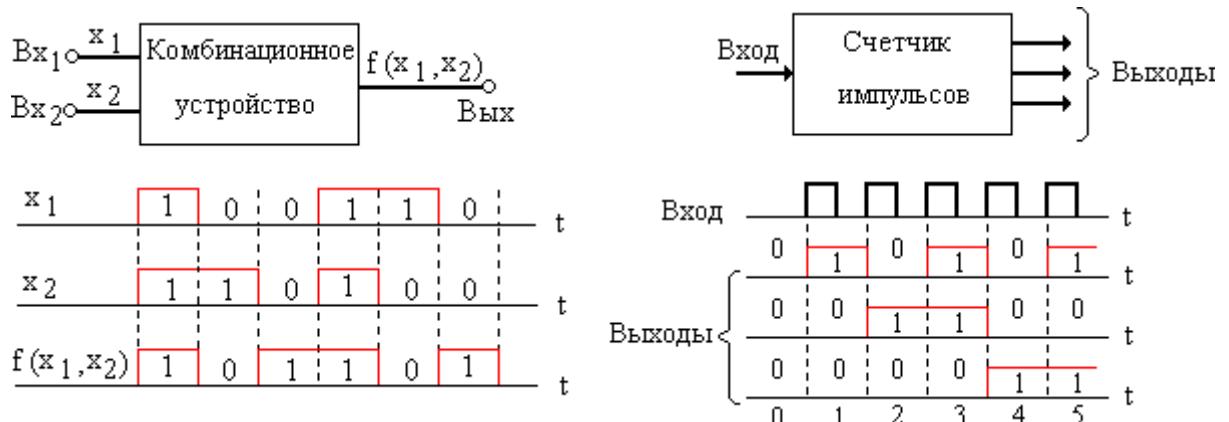
В *комбинационном устройстве* (называемом также *автоматом без памяти*) каждый символ на выходе (логический 0 или логическая 1) определяются лишь символами (лог. 0 или лог. 1), действующими в данный момент времени на входах устройства, и не зависит от того, какие символы ранее действовали на этих входах. В этом смысле комбинационные устройства лишены памяти (они не хранят сведений о прошлом работы устройства).

В *последовательностных устройствах* (или *автоматах с памятью*) выходной сигнал определяется не только набором символов, действующих на входах в данный момент времени, но и внутренним состоянием устройства, а последнее зависит от того, какие наборы символов действовали во все предшествующие моменты времени. Поэтому можно говорить, что последовательностные устройства обладают памятью (они хранят сведения о прошлом работы устройства).

Рассмотрим примеры работы комбинационного и последовательностного устройств.

Пусть устройство (рис. 3.2,а) предназначено для формирования на выходе сигнала, определяющего совпадение сигналов на входах: на выходе формируется логическая 1 в случаях, когда на обоих входах действует логическая 1, либо на обоих входах действует

логический 0; если на одном из входов действует лог. 1, а на другом - лог. 0, то на выходе устройства образуется лог. 0. Такое устройство является комбинационным, в котором значение формируемой на выходе логической функции определяется лишь значениями ее аргументов в данный момент времени.



Рассмотрим другой пример. Счетчик на 3.2, б подсчитывает импульсы. В каждый момент времени его состояние соответствует числу поступивших на вход импульсов. Выходная информация определяется тем, каково было состояние счетчика до данного интервала времени и поступает ли или нет на вход импульс в этом интервале времени. Таким образом, данное устройство является последовательностным устройством.

### Элементарные логические функции.

В классической математике для задания функции обычно используются два способа: аналитический (запись формулой) и табличный (таблицами значения функций, какие приводятся, например, в справочниках). Подобными же способами могут задаваться логические функции.

При использовании табличного способа строится так называемая *таблица истинности*, в которой приводятся все возможные сочетания значений аргументов и соответствующие им значения логической функции. Так как число таких сочетаний конечно, таблица истинности позволяет определять значение функции для любых значений аргументов (в отличии от таблиц математических функций, которые позволяют задавать значения функции не для всех, а лишь для некоторых значений аргументов).

Таблица истинности для одного аргумента приведена в таблице 3.1.

Аргумент $x$	Функции			
	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	$f_4(x)$
0	0	0	1	1
1	0	1	0	1

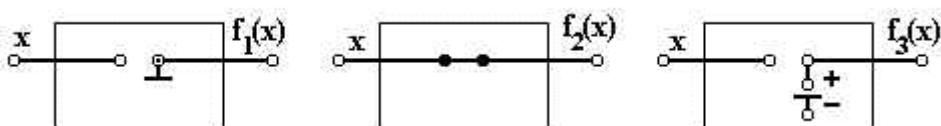
Возможен и аналитический способ записи логической функции. В обычной математике аналитический способ представления функции предполагает запись функции в виде математического выражения, в котором аргументы функции связываются определенными математическими операциями. Подобно этому аналитический способ задания логической функции предусматривает запись функции в форме логического выражения,

показывающего, какие и в какой последовательности должны выполняться логические операции над аргументами функции.

Функции одного аргумента (табл. 3.1) представляются следующими выражениями:

$$f_1(x)=0 \text{ (константа 0); } f_2(x)=x; \quad f_3(x)=x; \quad f_4(x)=1 \text{ (константа 1).}$$

Устройства, реализующие функции  $f_1(x)$ ,  $f_2(x)$  и  $f_4(x)$ , оказываются тривиальными. Как видно из рис.3.3, формирование функций  $f_1(x)$  требует разрыва между входом и выходом, формирование функции  $f_2(x)$  - соединения входа с выходом, формирование функции  $f_4(x)$  - подключения выхода к источнику сигнала лог.1. Таким образом, из всех функций одного аргумента практический интерес может представлять лишь функция  $f_3(x)=x$  (логическое НЕ).



### Свойства конъюнкции, дизъюнкции и инверсии.

Конъюнкция переменных  $x_1$  и  $x_2$  равна лог.1 в том случае, когда и  $x_1$  и  $x_2$  равны лог.1 (отсюда возникло название операции *логическое И*).

Дизъюнкция переменных  $x_1$  и  $x_2$  равна лог.1, если или  $x_1$  или  $x_2$  равна лог.1 (отсюда понятно возникновение названия операции: *логическое ИЛИ*).

В тех случаях, когда число переменных больше двух, конъюнкция их равна лог.1 при равенстве лог.1 всех переменных; дизъюнкция равняется лог.1, если хотя бы одна из них равна лог.1.

В математике установлен определенный порядок выполнения операций в сложном выражении. Например, в выражении  $x_1+x_2 \cdot x_3$  вначале выполняется операция умножения  $x_2 \cdot x_3$  и затем операция сложения. Если требуется изменить этот порядок, используются скобки. Например,  $(x_1+x_2) \cdot x_3$ . Здесь вначале выполняется операция в скобках.

Подобно этому и для сложного логического выражения установлен определенный порядок выполнения операций: вначале выполняются операции инверсии, затем операции конъюнкции и в последнюю очередь операции дизъюнкции. Например, запись логического выражения  $x_1 \vee x_2 \cdot x_3 \vee x_4 \cdot x_2$  предполагает, что при вычислении выражения вначале выполняются операции инверсии  $x_3$  и  $x_4$ , затем операции конъюнкции  $x_2 \cdot x_3$  и  $x_4 \cdot x_2$  и в последнюю очередь операции дизъюнкции. А если требуется нарушить это правило, используются скобки. Например,  $(x_1 \vee x_2) \cdot (x_3 \vee x_4)$ . В этом случае вначале выполняются операции в скобках (а если одни скобки вложены в другие, то вначале выполняются операции в самых внутренних скобках).

Операции конъюнкции и дизъюнкции обладают рядом свойств:

*сочетательный закон:*  $x_1 \cdot (x_2 \cdot x_3) = (x_1 \cdot x_2) \cdot x_3$ ,  $x_1 V (x_2 V x_3) = (x_1 V x_2) V x_3$ ;

*переместительный закон:*  $x_1 \cdot x_2 = x_2 \cdot x_1$ ,  $x_1 V x_2 = x_2 V x_1$ ;

*распределительный закон:*  $x_1 \cdot (x_2 V x_3) = x_1 \cdot x_2 V x_1 \cdot x_3$ ,  $x_1 V (x_2 \cdot x_3) = (x_1 V x_2) \cdot (x_1 V x_3)$ .

Легко убедиться в справедливости следующих выражений:

$$1 \cdot x = x; \quad x \cdot x = x; \quad 1 V x = 1; \quad x V x = x; \quad 0 \cdot x = 0; \quad x V x = 1. \quad (1.1)$$

Покажем справедливость так называемых формул де Моргана:

$$\overline{(x_1 V x_2)} = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2; \quad \overline{(x_1 \cdot x_2)} = x_1 V x_2. \quad (1.2)$$

В выражении  $\overline{(x_1 \cdot x_2)} = x_1 \cdot x_2$  левая часть  $\overline{(x_1 \cdot x_2)}$  обращается в 1 только в том случае, если  $x_1 V x_2 = 0$ , для чего необходимо  $x_1 = 0$  и  $x_2 = 0$ . Правая часть выражения обращается в 1 только при  $x_1 = 1$  и  $x_2 = 1$ , т.е. при  $x_1 = 0$  и  $x_2 = 0$ . Таким образом, только набор  $x_1 = 0$  и  $x_2 = 0$  обращает в 1 и правую и левую части выражения; следовательно, при отдельных наборах значений аргументов правая и левая части выражения будут равны 0, что и доказывает справедливость рассматриваемого равенства.

В выражении  $\overline{(x_1 \cdot x_2)} = x_1 V x_2$  и правая и левая части обращаются в 0 при  $x_1 = 1$  и  $x_2 = 1$ , при остальных наборах значений аргументов обе части выражения равны 1, что и доказывает справедливость данного равенства.

Можно сформулировать следующее правило применения формул де Моргана к сложным логическим выражениям. Инверсия любого сложного логического выражения, в котором аргументы (либо их инверсии) связаны операциями конъюнкции и дизъюнкции, может быть представлена тем же выражением без инверсии с изменением всех знаков конъюнкций на знаки дизъюнкций, знаков дизъюнкций на знаки конъюнкций и инверсий всех аргументов. Например,

$$\overline{(x_1 V x_2 \cdot \bar{x}_3 V \bar{x}_4 \cdot x_3 \cdot \bar{x}_4)} = \bar{x}_1 \cdot (\bar{x}_2 V x_3) \cdot (x_1 V \bar{x}_3 V x_4)$$

### Полные системы функций алгебры-логики.

Очевидно могут быть построены простейшие логические элементы, реализующие элементарные логические функции двух переменных  $f_0, \dots, f_{15}$ . Сложные логические функции могут быть построены последовательным выполнением функциональных зависимостей, связывающих пары переменных. Например, функция  $f(x_1, x_2, x_3, x_4) = (((x_1 \cdot x_1) \rightarrow x_3 | x_4) V x_1$  может быть получена с помощью схемы на рис. 3.4.

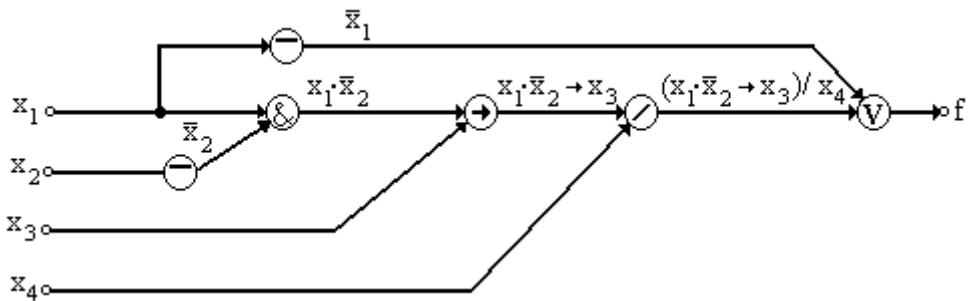


рис. 3.4

Следовательно, имея элементы, осуществляющие элементарные операции  $f_0, \dots, f_{15}$  можно выполнить любую сложную логическую операцию. Такую систему можно назвать *полной системой* или *базисом*. Условие наличия 16 различных типов логических элементов, каждый из которых реализует одну из 16 элементарных функций  $f_0, \dots, f_{15}$ , является достаточным для синтеза логических устройств любой сложности, но оно не является необходимым, т.е. при синтезе можно ограничиться меньшим набором элементарных функций, взятых из  $f_0, \dots, f_{15}$ .

Последовательно исключая из базиса функции, можно получить *минимальный базис*. Под минимальным базисом понимают такой набор функций, исключение из которого любой функции превращает полную систему функций в неполную.

Возможны различные базисы и минимальные базисы, отличающиеся друг от друга числом входящих в них функций и видом этих функций. Выбор того или иного базиса для синтеза логических устройств связан с тем, насколько просто, удобно и экономично технически выполнить элементы, реализующие входящие в базис функции, и в целом все логическое устройство.

Как показано выше, с помощью логических операций конъюнкции (И), дизъюнкции (ИЛИ) и инверсии (НЕ) можно выразить любую другую из элементарных функций  $f_0, \dots, f_{15}$ . Следовательно, эта совокупность логических функций образует базис. Это означает, что любая логическая функция, как бы сложна она не была, может быть представлена через логические операции И, ИЛИ, НЕ. Иначе, можно построить любое логическое устройство, имея лишь три типа логических элементов, выполняющих операции И, ИЛИ, НЕ.

Базис И, ИЛИ, НЕ не является минимальным. Из этой совокупности функций можно исключить функцию И, либо функцию ИЛИ и оставшийся набор функций будет удовлетворять свойствам базиса. Действительно, если исключить функцию И, то операцию И можно выразить через отсавшиеся операции ИЛИ и НЕ. Чтобы показать это, дважды инвертируем конъюнкцию и применем затем правило де Моргана.

$$x_1 \cdot x_2 = (\overline{\overline{x}_1 \cdot x_2}) = \overline{\overline{x}_1} \vee \overline{x_2}$$

Хотя операцию И можно выразить через операцию И и можно выразить через операции ИЛИ и НЕ, но это сложно (требуется выполнение трех операций инверсии и одной операции ИЛИ), поэтому на практике используется неминимальный базис, включающий в себя все эти три функции И, ИЛИ, НЕ.

Рассмотрим некоторые другие базисы. При этом выбранный набор логических функций

будет удовлетворять свойствам базиса, если с помощью этого набора функций окажется возможным выразить функции И и НЕ (либо функции ИЛИ и НЕ).

1. Базис образует функция Шеффера (И-НЕ). Действительно операции НЕ и И следующим образом можно выразить через операции И-НЕ:

$$x = (x \cdot \bar{x}) = x|x; \quad x_1 \cdot x_2 = (\overline{\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2}) = (\overline{x_1 | x_2}) = (x_1 | x_2) | (x_1 | x_2)$$

Таким образом, элементов одного типа, реализующих функцию И-НЕ, достаточно для построения логического устройства произвольной сложности.

2. Базис образует функция Вебба (ИЛИ-НЕ). Покажем, что операция НЕ и ИЛИ выражаются через операцию ИЛИ-НЕ.

$$x = x \vee \bar{x} = x \downarrow x; \quad x_1 \vee x_2 = (\overline{\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2}) = (\overline{x_1 \downarrow x_2}) = (x_1 \downarrow x_2) \downarrow (x_1 \downarrow x_2)$$

Таким образом, используя однотипные элементы, реализующие операцию ИЛИ-НЕ, можно построить логическое устройство любой сложности.

3. Базис образуют функция запрета  $f_4(x_1, x_2) = x_1 \Delta x_2$  и константа единицы. Действительно,

$$\bar{x} = 1 \cdot \bar{x} = 1 \Delta x; \quad x_1 \cdot x_2 = x_1 \cdot \bar{\bar{x}}_2 = x_1 \Delta \bar{x}_2 = x_1 \Delta \underbrace{(1 \Delta x_2)}_{\bar{x}_2}$$

В настоящее время базис И, ИЛИ, НЕ обычно используется при начальной стадии проектирования устройств для построения функциональной схемы. Для реализации устройств обычно используются базисы широко выпускаемые промышленностью в интегральном исполнении.

## СИНТЕЗ КОМБИНАЦИОННЫХ СХЕМ

### Синтез цифровых комбинационных схем по произвольной таблице истинности.

Любая цифровая комбинационная схема (логическая схема без памяти) полностью описывается [таблицей истинности](#). При этом необязательно, чтобы все комбинации входных цифровых сигналов были полезными. Возможна ситуация, когда только часть комбинаций входных логических сигналов является полезной. В этом случае выходные сигналы цифрового устройства для оставшихся комбинаций входных логических сигналов могут быть доопределены произвольно. Обычно при этом стараются выбирать цифровые значения выходных сигналов таким образом, чтобы схема цифрового устройства получилась простейшей.

Для реализации цифровых логических схем с произвольной таблицей истинности используется сочетание простейших логических элементов "И" "ИЛИ" "НЕ". Существует два способа синтеза цифровых схем, реализующих произвольную таблицу истинности. Это СКНФ (логическое произведение суммы входных сигналов) и СДНФ (сумма

логических произведений входных сигналов).

При синтезе цифровой схемы, реализующей произвольную таблицу истинности, каждый выход анализируется (и строится схема) отдельно и независимо.

### 3.3.1 Совершенная дизъюнктивная нормальная форма (СДНФ)

Для реализации таблицы истинности при помощи логических элементов "И" (СДНФ) достаточно рассмотреть только те строки таблицы истинности, которые содержат логические "1" в выходном сигнале. Строки, содержащие в выходном сигнале логический 0 в построении цифровой схемы не участвуют. Каждая строка, содержащая в выходном сигнале логическую "1", реализуется схемой логического элемента "И" с количеством входов, совпадающим с количеством входных сигналов в таблице истинности.

Входы				Выходы	
In0	In1	In2	In3	Out0	Out1
0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	0
0	0	1	0	0	0
0	0	1	1	0	0
0	1	0	0	0	0
0	1	0	1	0	1
0	1	1	0	1	0
0	1	1	1	0	0
1	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	1
1	0	1	0	0	0
1	0	1	1	0	0
1	1	0	0	1	0
1	1	0	1	0	0
1	1	1	0	0	0
1	1	1	1	0	1

Рис40. Произвольная таблица истинности.

Для синтеза цифровой схемы, реализующей сигнал Out0, достаточно рассмотреть строки, выделенные красным цветом. В таблице истинности три строки, содержащие единицу в выходном сигнале Out0, поэтому в формуле СДНФ будет содержаться три произведения входных сигналов — **термов**, а точнее минтермов:

$$Out0 = \overline{In0} \cdot \overline{In1} \cdot \overline{In2} \cdot In3 + \overline{In0} \cdot In1 \cdot In2 \cdot \overline{In3} + \overline{In0} \cdot \overline{In1} \cdot In2 \cdot In3$$

Так как количество переменных в каждом терме (ранг терма) данного логического выражения равно, то такое логическое выражение называется совершенным. (Совершенная Дизъюнктивная Нормальная Форма — СДНФ)

### 3.3.2 Совершенная конъюнктивная нормальная форма (СКНФ)

Еще одним способом реализации цифровых комбинационных схем является запись логического выражения в совершенной конъюнктивной нормальной форме (СКНФ).

Применение СКНФ оправдано при большом количестве логических единиц в выходном сигнале проектируемой цифровой схемы, как это показано в качестве примера в таблице истинности .

Таблица Пример таблицы истинности

№ комбинации	Входы				Выходы	
	8	4	2	1	a	b
0	0	0	0	0	1	1
1	0	0	0	1	0	1
2	0	0	1	0	1	1
3	0	0	1	1	1	1
4	0	1	0	0	0	1
5	0	1	0	1	1	0
6	0	1	1	0	1	0
7	0	1	1	1	1	1
8	1	0	0	0	1	1
9	1	0	0	1	1	1

Для реализации цифрового комбинационного устройства по таблице истинности при помощи логических элементов "ИЛИ" (СКНФ) достаточно рассмотреть только те строки таблицы истинности, которые содержат логические "0" в выходном сигнале. Строки, содержащие в выходном сигнале логическую "1" в построении логического выражения, а, следовательно, и принципиальной схемы цифрового устройства не участвуют.

Для построения схемы, реализующей сигнал Out0, достаточно рассмотреть строки, выделенные курсивом. В рассматриваемой таблице истинности имеются всего две строки, содержащие логический ноль в выходном сигнале а, поэтому в формуле СКНФ будет содержаться две суммы входных сигналов:

$$\alpha = (8 + 4 + 2 + \bar{1}) \cdot (8 + \bar{4} + 2 + 1)$$

### Минимизация логических функций при помощи карт Карно

Карта Карно — графический способ минимизации переключательных (булевых) функций, обеспечивающий относительную простоту работы с большими выражениями и устранение потенциальных гонок. Представляет собой операции попарного неполного склеивания и элементарного поглощения. Карты Карно рассматриваются как перестроенная соответствующим образом таблица истинности функции. Карты Карно можно рассматривать как определенную плоскую развертку n-мерного булева куба.

Карты Карно были изобретены в 1952 Эдвардом В. Вейчем и усовершенствованы в 1953 Морисом Карно, физиком из «Bell Labs», и были призваны помочь упростить цифровые электронные схемы.

В карту Карно булевы переменные передаются из таблицы истинности и упорядочиваются с помощью кода Грея, в котором каждое следующее число отличается от предыдущего только одним разрядом.

Основным методом минимизации логических функций, представленных в виде СДНФ или СКНФ является операция попарного неполного склеивания и элементарного поглощения. Операция попарного склеивания осуществляется между двумя термами (членами), содержащими одинаковые переменные, вхождения которых (прямые и инверсные) совпадают для всех переменных, кроме одной. В этом случае все переменные, кроме одной, можно вынести за скобки, а оставшиеся в скобках прямое и инверсное вхождение одной переменной подвергнуть склейке. Например:

$$\overline{X_1}X_2X_3X_4 \vee \overline{X_1}X_2\overline{X_3}X_4 = \overline{X_1}X_2X_4(X_3 \vee \overline{X_3}) = \overline{X_1}X_2X_4.$$

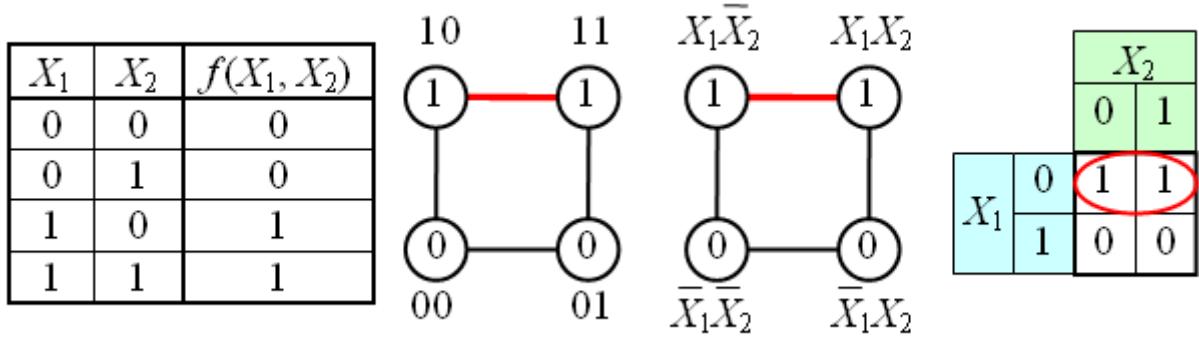
Возможность поглощения следует из очевидных равенств

$$A \vee \overline{A} = 1; A\overline{A} = 0.$$

Таким образом, главной задачей при минимизации СДНФ и СКНФ является поиск термов, пригодных к склейке с последующим поглощением, что для больших форм может оказаться достаточно сложной задачей. Карты Карно предоставляют наглядный способ отыскания таких термов.

Как известно, булевы функции  $N$  переменных, представленные в виде СДНФ или СКНФ могут иметь в своём составе  $2N$  различных термов. Все эти члены составляют некоторую структуру, топологически эквивалентную  $N$ -мерному кубу, причём любые два терма, соединённые ребром, пригодны для склейки и поглощения.

На рисунке изображена простая таблица истинности для функции из двух переменных, соответствующий этой таблице 2-мерный куб (квадрат), а также 2-мерный куб с обозначением членов СДНФ и эквивалентная таблица для группировки термов:



В случае функции трёх переменных приходится иметь дело с трёхмерным кубом.

### Синтез комбинационных устройств в заданном базисе

Цель синтеза - построение комбинационного устройства, обеспечивающего заданное функционирование, при минимальных аппаратурных затратах, при ограничениях, наложенных на используемую элементную базу.

Синтез комбинационного устройства осуществляется в следующей последовательности:

1. Функции, представленные в произвольной форме (чаще всего в табличной), записывают в виде логического выражения СДНФ либо СКНФ.
2. Проводится минимизация логических функций любым методом,
3. Логические функции переводятся в заданный базис, соответствующий ограничениям на элементную базу,
4. Строится функциональная схема комбинационного устройства.

В некоторых случаях этого бывает достаточно для построения комбинационного устройства.

С помощью одного элемента И-НЕ (штрих Шеффера) либо ИЛИ-НЕ (стрелка Пирса) можно реализовать любую функцию алгебры логики, каждый из элементов (И-НЕ), (ИЛИ-НЕ) в отдельности представляет функционально полную систему. С точки зрения унификации, регулярной структуры, использования однотипных микросхем целесообразно синтезировать комбинационное устройство полностью на одном из этих двух элементов. Стандартные микросхемы средней степени интеграции часто изготавливают в виде нескольких одинаковых элементов, выполненных в одном корпусе. Большие и сверхбольшие интегральные схемы (БИС и СБИС) на основе базовых матричных кристаллов (БМК) содержат в себе набор не соединенных однотипных ячеек, которые можно соединять различным образом для синтеза разнообразных устройств. Следовательно, задача синтеза комбинационных устройств в заданном базисе (И-НЕ) либо (ИЛИ-НЕ) является актуальной.

### Синтез комбинационного устройства в базисе и-не

Для синтеза комбинационного устройства в базисе И-НЕ получают минимальную дизъюнктивную нормальную форму МДНФ. Дальнейшие преобразования проводят на основе формулы Моргана для конъюнкций:

$$\bar{a} \vee \bar{b} = \overline{ab}.$$

Алгоритм синтеза в базисе И-НЕ проиллюстрируем на следующем примере МДНФ

$$y = x_2 \bar{x}_3 \vee \bar{x}_2 x_3 \vee x_1 x_2.$$

Соответствующая функциональная схема представлена на рис.3.5. Она содержит 6 элементов: два инвертора НЕ (*DD1*, *DD2*), три двух-входовых элемента 2И (*DD3*, *DD4*, *DD5*), один трехходовый элемент ЗИЛИ (*DD6*).

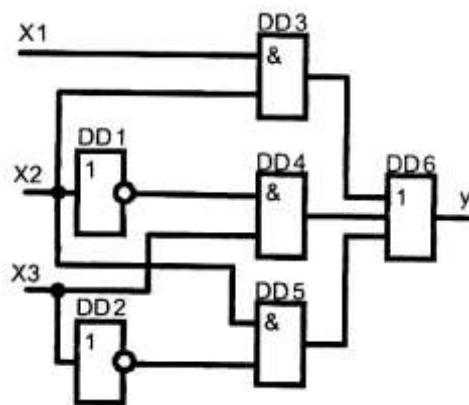


Рис. 3.5

Для перевода этого устройства в базис надо любым известным способом все элементы заменить схемами И-НЕ. Инверторы *DD1* и *DD2* заменяют схемами И-НЕ с объединенными входами. Схемы совпадения *DD3*, *DD4* и *DD5* заменяются схемами И-НЕ с дополнительными инверторами на выходах. Дополнительные инверторы заменяются схемами И-НЕ тем же способом что и устройства *DD1* и *DD2*. Для замены трехходовой схемы логического сложения *DD6* используется закон де Моргана. Для *DD6* можно записать

$$y = z_3 + z_4 + z_5 = \overline{\bar{z}_3 \cdot \bar{z}_4 \cdot \bar{z}_5}$$

где  $z_3, z_4, z_5$  – выходные сигналы схем *DD3*, *DD4*, *DD5*.

На основе приведенных соображений составьте самостоятельно полную схему устройства. Из неё можно увидеть, что между выходами И-НЕ и выходами ЗИ-НЕ образуется двойная инверсия логических сигналов. Эти инверторы можно удалить как бесполезные.

Функциональная схема, соответствующая рис.1 в базисе И-НЕ, представлена на рис.3.6.

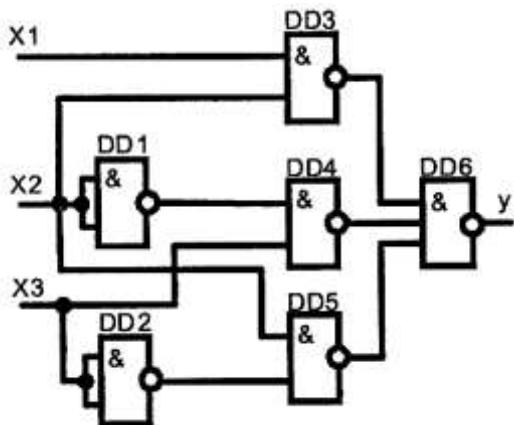


Рис.3.6

Схема рис. 3.6, так же, как и схема рис. 1 содержит 6 элементов. Только теперь все элементы однотипные И-НЕ.

Кроме рассмотренных общих случаев при синтезе цифровых устройств могут возникать ситуации, имеющие свои особенности. Отметим некоторые из них и укажем пути расчета.

*Синтез устройства с несколькими выходами.* Если каждый из выходов минимизировать и синтезировать отдельно, то в целом устройство окажется неминимальным. Для минимизации всего устройства в целом необходимо проводить поиск общих элементов для различных выходов.

После синтеза функциональной схемы логического устройства проектировщик переходит к разработке принципиальной схемы. Решаются задачи по выявлению и устраниению сбоев, резервирования и технической диагностики. Выбираются интегральные схемы. Проводится расчет временных задержек, электрических параметров, токов и напряжений, действующих в схеме. После этого составляется принципиальная и монтажная схемы.

## ГЛАВА 4 Программируемые логические контроллеры и интел. реле

### Контроллеры для систем автоматизации

Слово "контроллер" произошло от английского "control" (управление), а не от русского "контроль" (учет, проверка). Контроллером в системах автоматизации называют устройство, выполняющее управление физическими процессами по записанному в него алгоритму, с использованием информации, получаемой от датчиков и выводимой в исполнительные устройства.

Первые контроллеры появились на рубеже 60-х и 70-х годов в автомобильной промышленности, где использовались для автоматизации сборочных линий. В то время компьютеры стоили чрезвычайно дорого, поэтому контроллеры строились на жесткой логике (программировались аппаратно), что было гораздо дешевле. Однако перенастройка с одной технологической линии на другую требовала фактически изготовления нового контроллера. Поэтому появились контроллеры, алгоритм работы которых мог быть

изменен несколько проще - с помощью схемы соединений реле. Такие контроллеры получили название программируемых логических контроллеров (ПЛК), и этот термин сохранился до настоящего времени. Везде ниже термины "контроллер" и "ПЛК" мы будем употреблять как синонимы.

Немного позже появились ПЛК, которые можно было программировать на машинно-ориентированном языке, что было проще конструктивно, но требовало участия специально обученного программиста для внесения даже незначительных изменений в алгоритм управления. С этого момента началась борьба за упрощение процесса программирования ПЛК, которая привела сначала к созданию языков высокого уровня, затем - специализированных языков визуального программирования, похожих на язык релейной логики.

ПЛК используются практически во всех сферах человеческой деятельности для автоматизации технологических процессов, в системах противоаварийной защиты и сигнализации, в станках с ЧПУ, для управления дорожным движением, в системах жизнеобеспечения зданий, для сбора и архивирования данных, в системах охраны, в медицинском оборудовании, для управления роботами, в системах связи, при постановке физического эксперимента, для управления космическими кораблями, для автоматизации испытаний продукции и т. д. Тем не менее, до сих пор остается много отраслей экономики, куда контроллерная автоматизация только начинает проникать.

Согласно последнему опросу по Интернет, проведенному журналом [ControlEngineering](#) совместно с ReedResearch, большая часть опрошенных использует ПЛК в задачах управления станками. На втором месте - задачи, связанные с управлением технологическими процессами, далее идет управление перемещениями и задачи диагностики. Чаще всего контроллеры используют для решения собственных задач (54%), реже для производства оборудования для продажи (25%), или для того и другого (17%).

Контроллеры используются не только как автономные средства локального управления технологическим установкам, но и в составе широкомасштабных систем автоматизированного управления целыми предприятиями.

В настоящее время на Российском рынке преобладают контроллеры иностранных фирм: Siemens, Mitsubishi, ABB, SchneiderElectric, GE Fanuc, однако с течением времени увеличивается доля рынка, занятая отечественной продукцией Российских фирм (НИЛ АП, Текон, Фаствел, ДЭП, Овен, Элемер, Эмикон и др.), что соответствует общемировой тенденции, когда в большинстве стран отечественные фирмы занимают большую долю рынка, чем иностранные. Это объясняется следующими факторами:

- благодаря использованию западных технологических линий и материалов качество изготовления Российских контроллеров часто превосходит зарубежное качество в связи с более высоким уровнем подготовки Российских специалистов;
- Российские фирмы обеспечивают более квалифицированную техническую поддержку и русскоязычную документацию;
- большую роль играет срок поставки и территориальная близость производителя к потребителю;
- соответствие отечественных разработок Российским стандартам, чего часто нельзя сказать об импортных контроллерах;
- лучшее знание Российского рынка отечественными производителями.

Широкому распространению ПЛК в большой степени способствует рост компьютерной

грамотности населения, спецкурсы в ВУЗах, множество курсов повышения квалификации, проводимых ведущими системными интеграторами.

Жесткие ограничения на стоимость и огромное разнообразие целей автоматизации привели к невозможности создания универсального ПЛК, как это случилось с офисными компьютерами. Область автоматизации выдвигает множество задач, в соответствии с которыми развивается и рынок, содержащий сотни непохожих друг на друга контроллеров, различающихся десятками параметров. Каждый производитель выпускает несколько типов ПЛК разной мощности и стоимости, чтобы увеличить прибыль за счет сегментирования рынка.

Выбор оптимального для конкретной задачи контроллера основывается обычно на соответствии функциональных характеристик контроллера решаемой задаче при условии минимальной его стоимости. Учитываются также другие важные характеристики (температурный диапазон, надежность, бренд изготовителя, наличие разрешений Ростехнадзора, сертификатов и т. п.).

Несмотря на огромное разнообразие контроллеров, в их развитии заметны следующие общие тенденции:

- уменьшение габаритов;
- расширение функциональных возможностей;
- увеличение количества поддерживаемых интерфейсов и сетей;
- использование идеологии "открытых систем";
- использование языков программирования стандарта МЭК 61131-3;
- снижение цены.

Еще одной тенденцией является появление в контроллерах признаков компьютера (наличие мыши, клавиатуры, монитора, ОС Windows, возможности подключения жесткого диска), а в компьютерах - признаков контроллера (расширенный температурный диапазон, электронный диск, защита от пыли и влаги, крепление на DIN-рейку, наличие сторожевого таймера, увеличенное количество коммуникационных портов, использование ОС жесткого реального времени, функции самотестирования и диагностики, контроль целостности прикладной программы). Появились компьютеры в конструкциях для жестких условий эксплуатации. Аппаратные различия между компьютером и контроллером постепенно исчезают. Основными отличительными признаками контроллера остаются его назначение и наличие технологического языка программирования.

## Типы ПЛК

Для классификации огромного разнообразия существующих в настоящее время контроллеров рассмотрим их существенные различия.

Основным показателем ПЛК является количество каналов ввода-вывода. По этому признаку ПЛК делятся на следующие группы:

- нано-ПЛК (менее 16 каналов);
- микро-ПЛК (более 16, до 100 каналов);
- средние (более 100, до 500 каналов);

- большие (более 500 каналов).

По расположению модулей ввода-вывода ПЛК бывают:

- моноблочными - в которых устройство ввода-вывода не может быть удалено из контроллера или заменено на другое. Конструктивно контроллер представляет собой единое целое с устройствами ввода-вывода (например, одноплатный контроллер). Моноблочный контроллер может иметь, например, 16 каналов дискретного ввода и 8 каналов релейного вывода;
- модульные - состоящие из общей корзины (шасси), в которой располагаются модуль центрального процессора и сменные модули ввода-вывода. Состав модулей выбирается пользователем в зависимости от решаемой задачи. Типовое количество слотов для сменных модулей - от 8 до 32;
- распределенные (с удаленными модулями ввода-вывода) - в которых модули ввода-вывода выполнены в отдельных корпусах, соединяются с модулем контроллера по сети (обычно на основе интерфейса RS-485) и могут быть расположены на расстоянии до 1,2 км от процессорного модуля.

Часто перечисленные конструктивные типы контроллеров комбинируются, например, моноблочный контроллер может иметь несколько съемных плат; моноблочный и модульный контроллеры могут быть дополнены удаленными модулями ввода-вывода, чтобы увеличить общее количество каналов.

Многие контроллеры имеют набор сменных процессорных плат разной производительности. Это позволяет расширить круг потенциальных пользователей системы без изменения ее конструктива.

По конструктивному исполнению и способу крепления контроллеры делятся на:

- панельные (для монтажа на панель или дверцу шкафа);
- для монтажа на DIN-рейку внутри шкафа;
- для крепления на стене;
- стоечные - для монтажа в стойке;
- бескорпусные (обычно одноплатные) для применения в специализированных конструкциях производителей оборудования (OEM - "OriginalEquipmentManufacturer").

По области применения контроллеры делятся на следующие типы:

- универсальные общепромышленные;
- для управления роботами;
- для управления позиционированием и перемещением;
- коммуникационные;
- ПИД-контроллеры;
- специализированные.

По способу программирования контроллеры бывают:

- программируемые с лицевой панели контроллера;
- программируемые переносным программатором;
- программируемые с помощью дисплея, мыши и клавиатуры;

- программируемые с помощью персонального компьютера.

Контроллеры могут программироваться на следующих языках:

- на классических алгоритмических языках (C, C#, VisualBasic);
- на языках МЭК 61131-3.

Контроллеры могут содержать в своем составе модули ввода-вывода или не содержать их. Примерами контроллеров без модулей ввода-вывода являются коммуникационные контроллеры, которые выполняют функцию межсетевого шлюза, или контроллеры, получающие данные от контроллеров нижнего уровня иерархии АСУ ТП.

## Архитектура

Архитектурой контроллера называют набор его основных компонентов и связей между ними. Типовой состав ПЛК включает центральный процессор, память, сетевые интерфейсы и устройства ввода-вывода. Иногда эта конфигурация дополняется устройством для программирования и пультом оператора, устройствами индикации, реле - принтером, клавиатурой, мышью или трекболом.

*Процессорный модуль* включает в себя микропроцессор (центральное процессорное устройство - ЦПУ), запоминающие устройства, часы реального времени и сторожевой таймер. Термины "микропроцессор" и "процессор" в настоящее время стали синонимами, поскольку все вновь выпускаемые процессоры выполняются в виде СБИС, т.е. являются микропроцессорами.

Основными характеристиками *микропроцессора* являются разрядность (в ПЛК используются 8-ми, 16-ти и 32-разрядные микропроцессоры), тактовая частота, архитектура, наличие операций с плавающей точкой, типы поддерживаемых портов ввода-вывода, температурный диапазон работоспособности и потребляемая мощность.

Производительность микропроцессоров с одной и той же архитектурой пропорциональна тактовой частоте. Большинство контроллеров используют микропроцессоры с сокращенным набором команд (RISC - ReducedInstructionSetComputing), в которых используется небольшое количество команд одинаковой длины и большое количество регистров. Сокращенный набор команд позволяет строить более эффективные компиляторы и конвейер процессора, способный за каждый такт выдавать результат исполнения очередной команды.

Для контроллеров, выполняющих интенсивную математическую обработку данных, важно наличие математического сопроцессора (вспомогательного процессора, выполняющего операции с плавающей точкой) или сигнальных процессоров, в которых операции типа  $Y=A*B+X$  выполняются за один такт. Сигнальные процессоры позволяют ускорить выполнение операций свертки или быстрого преобразования Фурье.

*Емкость памяти* определяет количество переменных (тегов), которые могут быть обработаны в процессе функционирования ПЛК. В микропроцессорах время доступа к памяти является одним из существенных факторов, ограничивающих быстродействие. Поэтому память делят на несколько уровней иерархии, в зависимости от частоты использования хранящихся в ней данных и быстродействия. Иерархия памяти относится к существенным характеристикам архитектуры процессора, поскольку она позволяет

снизить отрицательное влияние медленной памяти на быстродействие микропроцессора. Основными типами памяти является постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) и набор регистров. Регистры являются самыми быстродействующими элементами памяти, поскольку они используются арифметико-логическим устройством (АЛУ) для исполнения элементарных команд процессора. ПЗУ используют для хранения редко изменяющейся информации, такой, как операционная система, драйверы устройств, загрузчик, исполняемый модуль программы пользователя. ОЗУ используется для хранения данных, которые многократно изменяются в процессе работы контроллера, например, значения тегов, результаты промежуточных вычислений, диагностическая информация, массивы, выводимые на графики, данные для отображения на дисплее.



Рис. 4.1 Типовая архитектура ПЛК

В качестве ПЗУ (или ROM - "ReadOnlyMemory") обычно используется электрически стираемая перепрограммируемая память (EEPROM - "ElectricallyErasableProgrammable ROM"). Разновидностью EEPROM является флэш-память, принцип действия которой

основан на хранении заряда в конденсаторе, образованном плавающим затвором и подложкой МОП-транзистора. Особенностью флэш-памяти является ее энергонезависимость, т.е. сохраняемость данных при выключенном питании. Стирание и перезапись во флэш-памяти выполняется не отдельными ячейками, а большими блоками, поэтому она получила название, происходящее от английского "flash" - "вспышка". Недостатком всех ПЗУ является низкое быстродействие.

Количество циклов записи информации во флэш-память ограничено и составляет несколько десятков тысяч раз. По конструктивному исполнению и интерфейсам флэш-память подразделяется на CompactFlash (CF), MemoryStick, SecureDigital (SD), MultiMediaCard (MMC), RS-MMC, SmartMediaCard (SMC), USB-flash. Флэш-память может быть впаяна в печатную плату или быть съемной.

В качестве ОЗУ современные микропроцессоры используют статическую память (SRAM - StaticRandomAccessMemory) и динамическую (DRAM - "DynamicRandomAccessMemory"), SDRAM ("Synchronous DRAM"). SRAM выполняется на триггерах, информация в которых сохраняется неограниченно долго при наличии питания. В динамической памяти информация хранится на конденсаторах и поэтому DRAM требует периодической регенерации (перезарядки конденсаторов). К недостаткам триггерной памяти относится ее высокая стоимость, связанная с низкой плотностью компоновки триггеров на кристалле, и малое отношение емкости к цене. Достоинством является высокое быстродействие, достигающее гигагерц, в то время как память на конденсаторах не может работать на частотах выше сотен герц. Оба типа памяти (DRAM и SRAM) не могут сохранять информацию при отключении питания ПЛК. Поэтому некоторые типы ПЛК используют батарейное питание памяти для сохранения работоспособности системы автоматизации после кратковременного прерывания питания.

Моноблочные и модульные контроллеры используют, как правило, параллельную шину для обмена данными с модулями ввода-вывода, что позволяет на порядок повысить быстродействие их опроса по сравнению с последовательнойшиной. Параллельные шины могут быть стандартными (ISA, PC/104, PCI, ComactPCI, VME, CXM) или частноfirmенными. Последовательная шина контроллера (на основе интерфейса RS-485) используется для подключения к нему удаленных (распределенных) модулей ввода-вывода.

## Процессорный модуль

Процессорный модуль ПЛК выполняет следующие задачи:

- собирает данные из модулей ввода в память и отсылает данные из памяти в модули вывода;
- выполняет обмен данными с устройством для программирования контроллера;
- выдает метки часов реального времени;
- осуществляет обмен данными с промышленной сетью;
- реализует стек протоколов промышленной сети (для этой цели могут использоваться вспомогательные коммуникационные процессоры);
- выполняет начальную загрузку и исполнение операционной системы;
- исполняет загрузочный модуль пользовательской программы системы автоматизации;
- управляет актами обмена с памятью.

Одной из тенденций в развитии ПЛК является использование процессорных модулей

разной мощности для одного конструктива контроллера. Это позволяет получить серию контроллеров разной мощности и тем самым покрыть больший сегмент рынка, а также выполнить модернизацию (upgrade) контроллеров, купленных потребителями, путем замены всего одного модуля.

К основным характеристикам процессорного модуля относятся:

- тип операционной системы (Windows CE, Linux, DOS, OS-9, QNX и др.);
  - наличие исполнительной среды для стандартной системы программирования на языках МЭК 61131-3;
  - типы поддерживаемых интерфейсов (RS-232, RS-422, RS-485, CAN, USB, Ethernet и др.);
  - типы поддерживаемых сетей (Modbus RTU, Modbus TCP, Ethernet, Profibus, CANopen, DeviceNet и др.);
  - возможность подключения устройств индикации или интерфейса оператора (светодиодного или ЖКИ индикатора, клавиатуры, мыши, дисплея с интерфейсами VGA, DVI или CMOS, LVDS, трекбола и др.);
  - разрядность (8, 16, 32 или 64 бита);
  - тактовая частота микропроцессора и памяти;
- 
- время выполнения команд;
  - объем, иерархия и типы памяти (ОЗУ, кэш, ПЗУ - флэш, съемная флэш и др.);
  - типы встроенных функций (ПИД-регулятор, счетчики, ШИМ, алгоритмы позиционирования и управления движением и др.);
  - бренд производителя (Intel, AMD, Atmel, Motorola, [RealLab](#), и др.).

Быстродействие процессорного модуля ПЛК обычно оценивают по времени выполнения логических команд, поскольку они наиболее распространены при реализации алгоритмов управления.

Огромное разнообразие задач, возлагаемых на ПЛК, и сильная зависимость цены от мощности контроллера явились причиной большого разнообразия используемых микропроцессоров, от простых и дешевых 8-разрядных Atmel и Microchip до самых высокопроизводительных микропроцессоров серии IntelPentium, включая двухъядерные и четырехъядерные процессоры.

Восьмиразрядные микропроцессоры пользуются большим успехом в автономных ПИД-контроллерах и микро-ПЛК для несложного алгоритмического управления станками, теплицами, небольшими технологическими аппаратами, в качестве межсетевых шлюзов. Их достоинством является высокая надежность, связанная с предельной простотой программного обеспечения.

Обычно микропроцессоры, используемые в ПЛК, на несколько поколений отстают от процессоров офисных персональных компьютеров (ПК) в связи с относительно малым объемом рынка ПЛК, который не обеспечивает окупаемость разработки нового контроллера за период смены поколений микропроцессоров.

## **Источник питания**

Стандартными напряжениями питания ПЛК являются напряжения 12 В, 24 и 48 В. Источником электрической энергии обычно является промышленная сеть 220В, 50 Гц. В случае распределенных систем автоматизации источник питания может быть расположен вдали от ПЛК, поэтому напряжение на клеммах ПЛК или модулей ввода-вывода может сильно отличаться от напряжения источника питания вследствие падения напряжения на сопротивлении кабеля. Для решения этой проблемы каждый ПЛК или каждый модуль удаленного ввода снабжаются встроенным стабилизатором напряжения, который обеспечивает нормальное их функционирование в диапазоне напряжений от 10 до 30 В.

Низкое напряжение питания позволяет питать контроллеры от аккумуляторов бортовых сетей транспортных средств или переносных аккумуляторов.

В ПЛК иногда используют батарею для питания часов реального времени (которые должны функционировать при выключенном ПЛК) и для сохранения информации в ПЗУ на время аварийных перерывов питания.

## Характеристики

*Производительность* ПЛК оценивается по следующим параметрам:

- длительность контроллерного цикла (период считывания значений из каналов ввода, обработки в процессоре и записи в каналы вывода);
- время выполнения команд (отдельно логических, с фиксированной и с плавающей точкой);
- пропускная способность шины между контроллером и модулями ввода-вывода;
- пропускная способность промышленной сети;
- время цикла опроса всех контроллеров в одномастерной сети или цикл обращения маркера для многомастерных сетей с маркером

Контроллер в системах автоматизации выполняет циклический алгоритм, включающий ввод данных и размещение их в ОЗУ, обработку данных и вывод. Длительность контроллерного цикла (его еще называют рабочим циклом) зависит от количества модулей ввода-вывода и наличия в них замаскированных (исключенных из процедуры обмена) входов-выходов, поэтому рассчитывается для каждой конфигурации автоматизированной системы отдельно. При интенсивной математической обработке данных (например, при цифровой фильтрации, интерполяции или идентификации объекта управления в режиме нормального функционирования системы) длительность контроллерного цикла существенно зависит от быстродействия процессорного модуля. В контроллерный цикл входит также обслуживание аппаратных ресурсов ПЛК (обеспечение работы системных таймеров, оперативное самотестирование, индикация состояния), контроль времени цикла, сетевой обмен, управление многозадачностью, отображение процесса выполнения программы на дисплее и т. п.

Перед началом работы ПЛК выполняет загрузку операционной системы и программы пользователя в ОЗУ и ПЗУ, начальное тестирование аппаратуры. ПЛК обычно может работать в режиме отладки, пошагового выполнения программы, просмотра и редактирования значений переменных и т. п.

В процессе функционирования ПЛК данные, введенные из устройств ввода, располагаются в ОЗУ и в течение рабочего цикла контроллера не изменяются. Прямое

чтение входа во время выполнения одного цикла не выполняется. Это ускоряет процесс обработки данных и исключает непредвиденные ситуации .

В системах с распределенными по объекту модулями ввода-вывода длительность контроллерного цикла может определяться пропускной способностью промышленной сети, что в ряде случаев является ограничением на предельное количество модулей ввода-вывода.

Требования к длительности контроллерного цикла существенно зависят от области применения ПЛК. При управлении тепловыми процессами длительность цикла может составлять единицы и десятки секунд, в задачах для управления станками она измеряется миллисекундами, при опросе датчиков температуры на элеваторе контроллерный цикл измеряется сутками.

*Время реакции* контроллера - это интервал времени от момента появления воздействия на систему (со стороны модулей ввода или оператора) до момента выработки соответствующей реакции. Время реакции зависит от длительности рабочего цикла контроллера, которое определяется быстродействием модулей ввода-вывода и

производительностью процессора.

В контроллерах для ответственных применений могут быть предусмотрены следующие функции самодиагностики

- обнаружение ошибок центрального процессора;
- сигнализация о срабатывании сторожевого таймера;
- обнаружение отказа батареи или источника питания;
- обнаружение сбоя памяти;
- проверка программы пользователя;
- обнаружение выхода из строя предохранителя;
- обнаружение обрыва или к. з. в цепи датчика и нагрузки.

В контроллерах для систем противоаварийной защиты (ПАЗ) и сигнализации, а также для опасных промышленных объектов может быть предусмотрена возможность резервирования отдельных частей системы: промышленной сети, процессорного модуля или контроллера, источника питания, сетевого сервера, замкнутых контуров автоматического регулирования, модулей ввода-вывода. Объектом резервирования обычно является наиболее ответственная или наиболее ненадежная часть системы [“”](#)

*Возможность горячей замены* элементов системы (т.е. без отключения питания) достигается одновременно аппаратными и программными средствами. Аппаратно предусматривается независимость начального состояния устройства от очередности подачи сигналов на его клеммы в процессе замены; программно обеспечивается возможность временного отсутствия компонента системы без ее зависания или перехода в аварийные режимы,.

*Надежность* контроллеров характеризуется наработкой на отказ, которая определяется как отношение суммарного времени работоспособного состояния контроллера к математическому ожиданию числа его отказов в течение этого времени (ГОСТ 27.002-89) или наработкой до отказа - временем от начала эксплуатации до первого отказа.

Надежность связана с допустимыми механическими перегрузками - амплитудой вибрации в требуемом диапазоне частот, допустимым ускорением при ударе.

Табл.. Значения цифр в обозначении IP степени защиты

<b>Первая цифра</b>	<b>Степень защиты. Краткое описание</b>
0	Защита отсутствует
1	Защита от твердых тел размером более 50 мм
2	Защита от твердых тел размером более 12 мм
3	Защита от твердых тел размером более 2,5 мм
4	Защита от твердых тел размером более 1 мм
5	Защита от пыли. Проникновение пыли исключено не полностью, однако пыль не должна проникать в количестве, достаточном для нарушения нормальной работы оборудования или снижения его безопасности
6	Пыленепроницаемость. Пыль не проникает в оболочку
<b>Вторая цифра</b>	
0	Защита отсутствует
1	Защита от капель воды
2	Защита от капель воды при наклоне до 15°
3	Защита от дождя
4	Защита от брызг
5	Защита от водяных струй
6	Защита от волн воды
7	Защита при погружении в воду
8	Защита при длительном погружении в воду

Для повышения безопасности систем автоматизации в контроллерах используются команды для установки начального состояния выходов сразу после подачи питания или в аварийном режиме. Эти состояния выбираются таким образом, чтобы после восстановления напряжения питания при случайном его прерывании или в аварийном режиме системы исполнительные устройства находились в безопасном для персонала или системы состоянии. Например, в системах с нагревом безопасным будет состояние отключенного нагревателя, в подъемных механизмах - состояние торможения. Наличие команд управление безопасными состояниями позволяет реализовать операцию автоматического рестарта автоматизированной системы после прерывания питания или после восстановления работоспособного состояния. Способность контроллера переводить свои выходы в заранее определенное состояние сразу после обнаружения снижения напряжения питания или после внутреннего отказа называется *отказоустойчивым отключением*.

Если повторный запуск ПЛК выполняется после того, как все динамические данные (переменные входов-выходов, состояние внутренних регистров, таймеров, счетчиков, программные контексты) были возвращены в заранее определенное состояние, то такой запуск называется *холодным рестартом*. Холодный рестарт может быть как ручным, так и автоматическим.

*Горячим рестартом* называют повторный запуск ПЛК, который выполняется настолько быстро после пропадания питания, что все динамические переменные не успевают измениться и поэтому работоспособность восстанавливается таким образом, будто питания не пропадало.

*Теплым рестартом* называют повторный запуск после обнаружения неисправности питания с заранее определенным и программируемым пользователем множеством динамических данных и системным контекстом\* прикладной программы. Теплый рестарт характеризуется сигнализацией состояния или эквивалентными средствами, позволяющими убедиться в том, что прикладная программа зарегистрировала прекращение неисправности питания, обнаруженное конфигурацией ПЛК в режиме пуска.

*Помехоустойчивость* контроллера обычно оценивается по его соответствию комплексу стандартов по электромагнитной совместимости

Промышленные контроллеры используют гальваническую изоляцию для устранения паразитных связей по общему проводу, земле и для защиты оборудования от высоких напряжений.

## Программируемые интеллектуальные реле

Программируемые интеллектуальные реле являются одной из разновидностей ПЛК (программируемые логические контроллеры). Применение интеллектуальных реле позволяет значительно упростить схемы управления электрооборудованием, повысить их надежность.

Задание программы для интеллектуальных реле производится при помощи кнопок на лицевой панели и небольшого, как правило, в одну – две строки LCD индикатора. Хотя существуют и более сложные конструкции, и в этих случаях программы приходится писать на персональном компьютере, с использованием специализированных языков программирования релейной логики LD, FBD и некоторых других.

Для загрузки (прошивки) готовых программ в память микроконтроллера используются интерфейсы типа RS-232, RS-485 или Industrial Ethernet, позволяющие также осуществлять связь с АСУ верхнего уровня. Некоторые модели **программируемых интеллектуальных реле** позволяют наращивать возможности коммуникации при помощи специальных модулей расширения.



Принцип работы ПЛК

**Отличие интеллектуальных реле от полноценных ПЛК в том, что они обладают малым объемом оперативной и программной памяти**, а это приводит к невозможности хоть сколько-нибудь сложных математических вычислений. Кроме того **количество каналов ввода – вывода как цифровых, так и аналоговых у интеллектуальных реле также невелико**, поэтому область их применения достаточно ограничена. Прежде всего, это автоматизация отдельных агрегатов, управление системами освещения, некоторыми устройствами в системе ЖКХ, локальные контуры различных систем автоматизации, бытовая техника.

**Конструкция программируемых интеллектуальных реле** чаще всего моноблочная, - в одном небольшом корпусе содержатся все узлы. Это, как правило, блок питания небольшой мощности, микроконтроллер, каналы ввода и вывода информации, клеммы для подключения исполнительных устройств. Корпуса таких устройств невелики и позволяют установку в электрических шкафах на DIN – рейку, что соответствует современным стандартам. Впрочем, блок питания может быть и отдельным устройством.

## **Классификация реле**

Реле классифицируются по различным признакам: по виду входных физических величин, на которые они реагируют; по функциям, которые они выполняют в системах управления; по конструкции и т. д. По виду физических величин различают электрические, механические, тепловые, оптические, магнитные, акустические и т.д. реле. При этом следует отметить, что реле может реагировать не только на значение конкретной величины, но и на разность значений (дифференциальные реле), на изменение знака величины (поляризованные реле) или на скорость изменения входной величины.

## **Устройство реле**

Реле обычно состоит из трех основных функциональных элементов: воспринимающего, промежуточного и исполнительного.

**Воспринимающий (первичный) элемент** воспринимает контролируемую величину и преобразует её в другую физическую величину.

**Промежуточный элемент** сравнивает значение этой величины с заданным значением и при его превышении передает первичное воздействие на исполнительный элемент.

**Исполнительный элемент** осуществляет передачу воздействия от реле в управляемые цепи. Все эти элементы могут быть явно выражеными или объединёнными друг с другом.

Воспринимающий элемент в зависимости от назначения реле и рода физической величины, на которую он реагирует, может иметь различные исполнения, как по принципу действия, так и по устройству. Например, в реле максимального тока или реле напряжения воспринимающий элемент выполнен в виде электромагнита, в реле давления – в виде мембранны или сильфона, в реле уровня – в виде поплавка и т.д.

По устройству исполнительного элемента реле подразделяются на контактные и бесконтактные.

**Контактные реле** воздействуют на управляемую цепь с помощью электрических контактов, замкнутое или разомкнутое состояние которых позволяет обеспечить или полное замыкание или полный механический разрыв выходной цепи.

**Бесконтактные реле** воздействуют на управляемую цепь путём резкого (скачкообразного) изменения параметров выходных электрических цепей (сопротивления, индуктивности, емкости) или изменения уровня напряжения (тока).

## Характеристики реле

Основные характеристики реле определяются зависимостями между параметрами выходной и входной величины.

Различают следующие основные характеристики реле.

1. **Величина срабатывания  $X_{ср}$  реле** – значение параметра входной величины, при которой реле включается. При  $X < X_{ср}$  выходная величина равна  $U_{min}$ , при  $X \geq X_{ср}$  величина  $U$  скачком изменяется от  $U_{min}$  до  $U_{max}$  и реле включается. Величина срабатывания, на которую отрегулировано реле, называется уставкой.
2. **Мощность срабатывания  $P_{ср}$  реле** – минимальная мощность, которую необходимо подвести к воспринимающему органу для перевода его из состояния покоя в рабочее состояние.
3. **Управляемая мощность  $P_{упр}$**  – мощность, которой управляют коммутирующие органы реле в процессе переключения. По мощности управления различают реле цепей малой мощности (до 25 Вт), реле цепей средней мощности (до 100 Вт) и реле цепей повышенной мощности (свыше 100 Вт), которые относятся к силовым реле и называются kontaktorами.
4. **Время срабатывания  $t_{ср}$  реле** – промежуток времени от подачи на вход реле сигнала  $X_{ср}$  до начала воздействия на управляемую цепь. По времени срабатывания различают нормальные, быстродействующие, замедленные реле и реле времени. Обычно для нормальных реле  $t_{ср} = 50\dots150$  мс, для быстродействующих реле  $t_{ср} 1$  с.

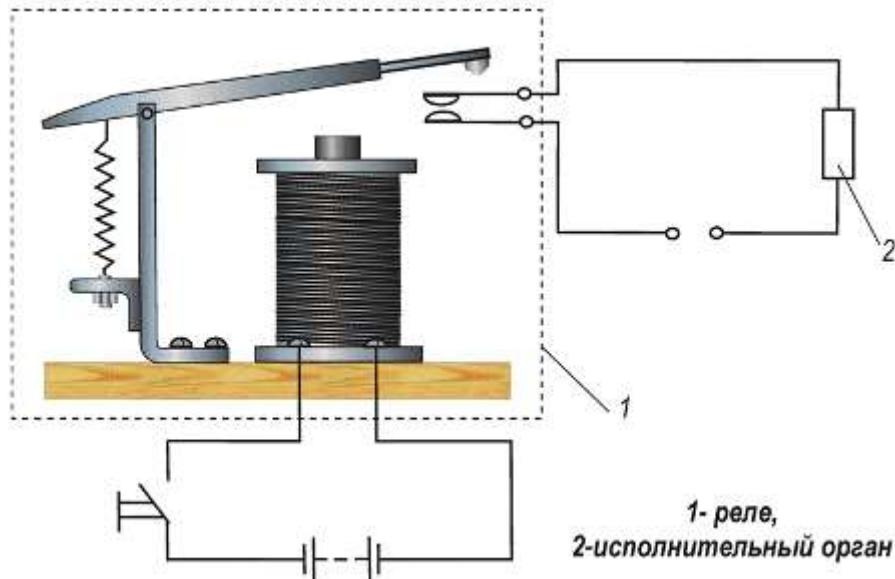
## Принцип действия и устройство электромагнитных реле

Электромагнитные реле, благодаря простому принципу действия и высокой надежности, получили самое широкое применение в [системах автоматики](#) и в схемах защиты электроустановок. Электромагнитные реле делятся на реле постоянного и переменного тока. Реле постоянного тока делятся на нейтральные и поляризованные. Нейтральные реле одинаково реагируют на постоянный ток обоих направлений, протекающий по его обмотке, а поляризованные реле реагируют на полярность управляющего сигнала.

Работа электромагнитных реле основана на использовании электромагнитных сил, возникающих в металлическом сердечнике при прохождении тока по виткам его катушки. Детали реле монтируются на основании и закрываются крышкой. Над сердечником электромагнита установлен подвижный якорь (пластина) с одним или несколькими контактами. Напротив них находятся соответствующие парные неподвижные контакты.

В исходном положении якорь удерживается пружиной. При подаче напряжения электромагнит притягивает якорь, преодолевая её усилие, и замыкает или размыкает

контакты в зависимости от конструкции реле. После отключения напряжения пружина возвращает якорь в исходное положение. В некоторые модели, могут быть встроены электронные элементы. Это резистор, подключенный к обмотке катушки для более чёткого срабатывания реле, или (и) конденсатор, параллельный контактам для снижения искрения и помех.



Управляемая цепь электрически никак не связана с управляющей, более того в управляемой цепи величина тока может быть намного больше чем в управляющей. То есть реле по сути выполняют роль усилителя тока, напряжения и мощности в электрической цепи.

Реле переменного тока срабатывают при подаче на их обмотки тока определенной частоты, то есть основным источником энергии является сеть переменного тока. Конструкция реле переменного тока напоминает конструкцию реле постоянного тока, только сердечник и якорь изготавливаются из листов электротехнической стали, чтобы уменьшить потери на гистерезис и [вихревые токи](#).

### Достоинства и недостатки электромагнитных реле

Электромагнитное реле обладает рядом преимуществ, отсутствующих у полупроводниковых конкурентов:

- способность коммутации нагрузок мощностью до 4 кВт при объеме реле менее 10 см<sup>3</sup>;
- устойчивость к импульсным перенапряжениям и разрушающим помехам, появляющимся при разрядах молний и в результате коммутационных процессов в высоковольтной электротехнике;
- исключительная электрическая изоляция между управляющей цепью (катушкой) и контактной группой — последний стандарт 5 кВ является недоступной мечтой для подавляющего большинства полупроводниковых ключей;
- малое падение напряжения на замкнутых контактах, и, как следствие, малое выделение тепла: при коммутации тока 10 А малогабаритное реле суммарно рассеивает на катушке и контактах менее 0,5 Вт, в то время как симисторное реле отдает в атмосферу более 15 Вт, что, во-первых, требует интенсивного охлаждения, а во-вторых, усугубляет парниковый эффект на планете;

- экстремально низкая цена электромагнитных реле по сравнению с полупроводниковыми ключами

Отмечая достоинства электромеханики, отметим и недостатки реле: малая скорость работы, ограниченный (хотя и очень большой) электрический и механический ресурс, создание радиопомех при замыкании и размыкании контактов и, наконец, последнее и самое неприятное свойство — проблемы при коммутации индуктивных нагрузок и высоковольтных нагрузок на постоянном токе.

Типовая практика применения мощных электромагнитных реле — это коммутация нагрузок на переменном токе 220 В или на постоянном токе от 5 до 24 В при токах коммутации до 10–16 А. Обычными нагрузками для контактных групп мощных реле являются нагреватели, маломощные электродвигатели (например, вентиляторы и сервоприводы), лампы накаливания, электромагниты и прочие активные, индуктивные и емкостные потребители электрической мощности в диапазоне от 1 Вт до 2–3 кВт.

Области применения интеллектуальных реле FAB достаточно широки. Это системы умного дома; автоматическое открывание дверей, шлагбаумов и ворот; [управление освещением](#) как внутренним, так и наружным; управление вентиляцией и регулирование температуры на предприятиях и в жилых помещениях, в оранжереях и теплицах. А также [управление системами водоснабжения](#), управление производственными линиями и отдельными станками, применение в системах охранной сигнализации, в аварийных системах оповещения и многое другое.

### **Краткие технические характеристики интеллектуальных реле FAB**

Реле оснащено LCD дисплеем имеющим 4 строки по 10 символов, имеется встроенный календарь и часы реального времени. Возможно дистанционное управление по телефонным линиям, и возможность передачи голосовых сообщений. В комплекте поставки идет бесплатная простая программа SCADA позволяющая осуществлять связь с ПК на достаточно большое расстояние, что дает возможность дистанционного мониторинга и настройки. В случае использования интерфейса RS – 485 к одному ПК могут быть подключены 255 реле FAB. Такое подключение позволяет создавать более функциональные системы, чем при использовании одиночных FAB реле.

Выходы устройства имеют высокую нагрузочную способность: релейные – 10А, транзисторные выходы – 2А.

Хотя память программы невелика – всего 64К, программа может содержать 127 функциональных блоков, 127 счетчиков, 127 интервалов RTC (реального времени), 127 таймеров, что позволяет создавать достаточно сложные функциональные программы. Ввод программы осуществляется либо с помощью кнопок и LCD-дисплея, либо с использованием ПК. Для защиты программы от несанкционированного доступа возможна защита паролем.

### **Отечественные программируемые реле**

В России выпуском программируемых реле занимаются воронежская фирма «Овен» и нижегородская «КонтрАвт». Фирма «Овен» выпускает свои реле под названием Овен ПЛК \*\*\*.

Воронежским ЗАО «Экоресурс» выпускается серия контроллеров «Базис», включающая в себя несколько модификаций прибора. В журналах «Автоматизация в промышленности», «Приборостроение и средства автоматизации» и «Промышленные АСУ и контроллеры» содержится целый цикл статей по применению контроллеров серии «Базис».

Некоторые фирмы занимаются распространением и продажей в России импортных брендов. Например, фирма Интехникс, торговый партнер английской компании Invertek Drives, занимающейся производством столь популярных в последнее время частотно-регулируемых приводов, поставляет в Россию и программируемые интеллектуальные реле, столь необходимые для создания систем автоматизации.

## ГЛАВА 5 ЦАП И АЦП

При построении систем, связывающих ЭВМ с объектами, использующими информацию в непрерывной форме, требуется преобразование сигналов из цифровой формы в аналоговую (непрерывную) форму и из аналоговой в цифровую. Такое преобразование сигналов осуществляется с помощью цифро-аналоговых и аналого-цифровых преобразователей.

### Цифро-аналоговые преобразователи

Цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП) называется устройство, осуществляющее автоматическое преобразование (декодирование) входных значений сигналов, представленных числовыми кодами, в эквивалентные им выходные значения аналоговой физической величины.

На схемах ЦАП изображается в виде УГО, на котором функция преобразования обозначается символами D/A или # / L:

Цифро-аналоговые преобразователи представляют собой класс устройств с чрезвычайно широким спектром применений. В этом спектре особо следует выделить использование ЦАП в качестве функционального блока АЦП, где он выполняет роль многозначной меры преобразованного аналогового сигнала, которая управляет кодом, формируемым на выходе АЦП, и располагается в цепи обратной связи. В качестве самостоятельного устройства ЦАП широко используются в измерительной и вычислительной технике, системах передачи, хранения и отображения информации, а также в системах управления технологическими процессами.

Преобразование обеспечивает соответствие между входным числовым значением  $N(t)$ , и ее аналоговым эквивалентом  $x(t)$ . Количественная связь для любого момента времени  $t$  определяется соотношением

$$x(t) = N(t) D_x \pm dx_i,$$

где  $D_x$  - шаг квантования по уровню (аналоговый эквивалент единицы младшего разряда кода);  $dx_i$  — погрешность преобразования на  $i$ -ом уровне квантования.

Цифро-аналоговое преобразование в ЦАП состоит в суммировании эталонных величин, соответствующих разрядам входного кода. Применяются в основном два метода цифро-анalogового преобразования: суммирование единичных эталонных величин и суммирование эталонных величин, веса которых отличаются. В первом при формировании выходной аналоговой величины используется только одна эталонная величина весом в один квант. Во втором методе применяются эталонные величины с весами, зависящими от номера разряда, и в суммировании участвуют только те эталонные

величины, для которых в соответствующем разряде входного кода имеется единица. При этом используется двоичный код. Выходным сигналом является напряжение.

Для ЦАП выходное напряжение определяется следующим образом:

$$U_{\text{вых}} = kU_{\text{оп}}(a_{n-1}2^{n-1} + a_{n-2}2^{n-2} + \dots + a_02^0),$$

где  $U_{\text{оп}}$ —опорное (эталонное) напряжение;  $a_0, a_1, \dots, a_{n-1}$ —коэффициенты двоичных разрядов, принимающие значения «0» или «1»;  $n$ —число двоичных разрядов;

$k$ —коэффициент пропорциональности.

В преобразователях из опорного напряжения формируются эталонные величины, соответствующие значениям разрядов входного кода, которые суммируются и образуют дискретные значения выходной аналоговой величины.

### Основные параметры ЦАП

Все параметры ЦАП можно разделить на две группы: *статические и динамические*.

#### Статические параметры ЦАП

Основными статическими параметрами ЦАП являются:

1. Число разрядов ЦАП;
2. Диапазон изменения входного кода;
3. Диапазон изменения выходного сигнала;
4. Разрешающая способность;
5. Погрешность преобразования.

Все статические параметры ЦАП могут быть определены по характеристике преобразования(ХП).

Характеристикой преобразования называют зависимость значений выходной аналоговой величины  $x_i$  от значений входного кода  $N_i$ . Такая зависимость может быть представлена в виде графика, формулы или таблицы. Рассматриваемые ЦАП имеют линейную характеристику преобразования. В системе координат код — выходная аналоговая величина ХП изображается прямой, расположенной под некоторым углом к оси абсцисс.

На рис. 2 изображена ХП 3-х разрядного ЦАП ( $n=3$ ). По оси абсцисс откладываются значения входного двоичного кода  $N_i$ , а по оси ординат относительные значения выходного аналогового сигнала  $x_i/x_{\max}$ .

Иногда характеристику преобразования изображают ступенчатой линией, что подчеркивает дискретность изменения как значения кода, так и выходной аналоговой величины.

1. Число разрядов ЦАП – это максимальное число разрядов, которое может быть подано на вход ЦАП и является наиболее общей характеристикой.

Согласно ГОСТ 24736-81, число разрядов — это двоичный логарифм максимального числа кодовых комбинаций на выходе ЦАП или выходе АЦП.

Тогда число  $n$  входных двоичных разрядов ЦАП однозначно соответствует количеству различных кодовых комбинаций на выходах по выражению

$$n = \log_2(N_{\max} - N_{\min}),$$

или при  $N_{\min}=0$

$$n = \log_2(N_{\max}).$$

2. Диапазон изменения входных значений кода (динамический диапазон) – это допустимый предел изменения входного кода – от  $N_{\min}$  до  $N_{\max}$ . При  $N_{\min}=0$  этот диапазон определяется как  $N_{\max}=2^n$ .

3. Диапазоном выходной величины называют интервал значений выходной аналоговой величины от начальной  $x_{\min}$  до конечной  $x_{\max}$  точки ХП. Значение дискретного изменения выходной аналоговой величины при изменении значения входного кода на единицу называют шагом квантования. В случае двоичного линейного ЦАП для идеальной характеристики все ступени равны:

$$\Delta x = (x_{\max} - x_{\min}) / (2^n - 1)$$

где  $x_{\max}$ ,  $x_{\min}$  — значение выходной аналоговой величины в конечной начальной точках ХП,  $(2^n - 1)$  — число возможных значений кода.

4. Разрешающей способностью преобразования является значение шага квантования, представляющее наименьшее изменение выходной аналоговой величины. Абсолютная разрешающая способность также выражается в единицах выходной аналоговой величины, а относительная - в процентах от диапазона изменения выходной аналоговой величины:

$$\Delta x \% = \frac{\Delta x}{(x_{\max} - x_{\min})} \cdot 100\%$$

Например, преобразователь на 12 цифровых входов, имеющий выходной сигнал в конечной точке ХП, равный 10В, обладает разрешающей способностью

$$\Delta x = \frac{10B - 0B}{2^{12} - 1} = 2,45 \text{ мВ},$$

$$\text{или } \Delta x \% = \frac{0,00245B}{10B - 0B} \cdot 100\% = 0,0245\%.$$

Значение ступени квантования может служить единицей измерения выходной аналоговой величины, и его называют единицей младшего разряда (ЕМР). Такая единица измерения наглядно представляет все параметры выходной аналоговой величины.

5. Погрешность квантования характеризуется статической и инструментальной погрешностями.

Статическая погрешность преобразования характеризуется погрешностью (шумом) квантования.

В общем случае погрешность квантования можно представить как

$$d(x) = x(t) - N_t D_x$$

При этом погрешность  $d(x)$  не превышает половины шага квантования т.е.

$$d(x) \leq \max \frac{1}{2} d(x) \leq 0,5 \times D_x$$

### Классификация и принципы построения ЦАП

Схемы ЦАП можно классифицировать по разным признакам: принципу действия, виду выходного сигнала, его полярности, типу элементной базы, характеру опорного сигнала, конструктивному исполнению и пр.

По принципу действия или способу формирования выходного сигнала различают ЦАП с суммированием напряжений, с делением напряжения и с суммированием токов.

По виду выходного сигнала ЦАП делят на две группы: с токовым выходом и с выходом по напряжению.

В настоящее время стремительный прогресс в области микроэлектроники определил расстановку акцентов в распространённости ЦАП тех или иных видов. Прежде всего это коснулось их конструктивного исполнения — наиболее распространёнными стали интегральные преобразователи. В свою очередь интегральное исполнение ЦАП способствовало развитию преобразователей с суммированием токов — как наиболее технологичных в этом отношении. Самыми технологичными из всех оказались резистивные схемы суммирования.

### Аналогово-цифровые преобразователи

Аналогово-цифровым преобразователем (АЦП) называется устройство, осуществляющее автоматическое преобразование непрерывно изменяющихся во времени аналоговых значений сигнала в эквивалентные значения числовых кодов.

На схемах ЦАП изображается в виде УГО (рис.1), на котором функция преобразования обозначается символами A/D или L/#:

АЦП являются устройствами, принимающими входные непрерывные сигналы от аналоговых устройств и выдающими на выходе соответствующие им цифровые сигналы, пригодные для работы с ЭВМ и другими цифровыми устройствами.

АЦП, так же как и ЦАП, широко применяются в различных областях, являясь неотъемлемой составной частью цифровых измерительных приборов, систем и устройств обработки и отображения информации, автоматических систем контроля и управления, устройств ввода—вывода информации ЭВМ и т. д.

Физически процесс аналого-цифрового преобразования состоит из операций дискретизации по времени, квантования по уровню и кодирования.

При дискретизации непрерывная функция  $x(t)$  преобразуется в последовательность её отсчетов  $x(t_k)$  в определенные моменты времени  $t_k$ .

Операция квантования состоит в том, что мгновенные значения отсчетов  $x(t_k)$  ограничиваются только определенными уровнями ограниченного множества, которые называются уровнями квантования.

Третья операция, называемая кодированием, представляет собой преобразование дискретных квантованных величин в цифровой код.

Преобразование обеспечивает соответствие дискретного отсчета  $x(t_k)$  значению кода  $N_k$ . Количественная связь для любого момента времени  $t_k$  определяется соотношением:

$$N_k = x(t_k) / \Delta x \pm \delta N_k,$$

где  $\delta N_k$  — погрешность преобразования на  $k$ -том шаге дискретизации по времени,  $\Delta x$  — шаг квантования по уровню.

#### Основные параметры АЦП

Все параметры АЦП также как и ЦАП можно разделить на две группы: *статические и динамические*.

#### Статические параметры АЦП

Основными статическими параметрами АЦП являются:

Число разрядов АЦП;

Диапазон изменения входного сигнала;

Диапазон изменения выходного кода;

Разрешающая способность;

Статическая погрешность преобразования.

Основные параметры АЦП (диапазон изменения, временные параметры, статическая погрешность) имеют тот же смысл, что и соответствующие параметры ЦАП, рассмотренные ранее. Поэтому рассмотрим только некоторые характерные особенности параметров АЦП.

Наибольший интерес представляют статические параметры АЦП, характеризующие их точностные характеристики.

Число разрядов, или разрядность АЦП, как уже говорилось выше,— это округленный до целого числа двоичный логарифм максимального значения выходного кода  $n=\log_2 N_{\max}$ ,  $N$ — число значений выходного кода.

При подаче на вход АЦП линейно изменяющегося напряжения на выходе АЦП наблюдается последовательное изменение кодов.

Характеристикой преобразования АЦП называется зависимость между значениями входного аналогового напряжения и выходного кода. Характеристика преобразования АЦП, как и для ЦАП, может быть определена в виде таблиц, графиков или формул.

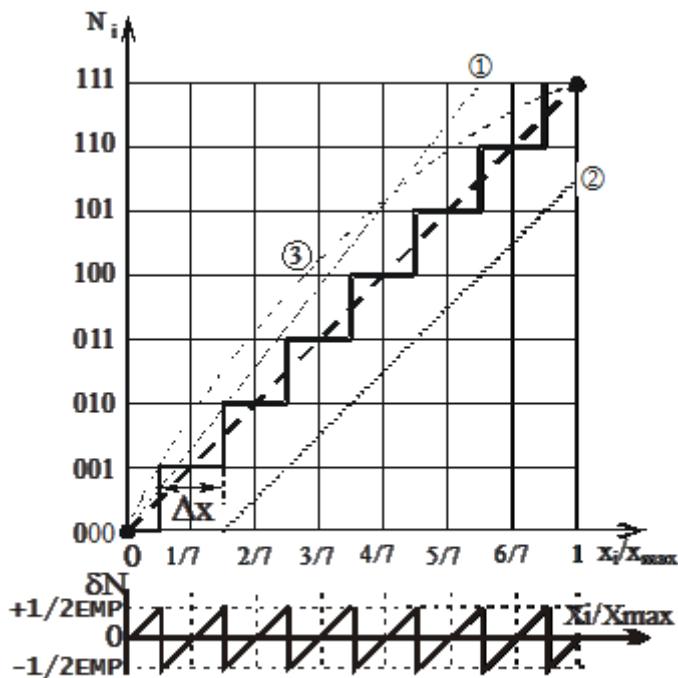


Рис. 2.

На рис. 2 показана характеристика преобразования однополярного АЦП и график изменения ошибок квантования.

Разность значений напряжений заданного и следующего за ним межкодового переходов определяет шаг квантования. Для того, чтобы прямая, проведенная через точки, соответствующие напряжениям 0Ви  $X_{max}$  прошла через центры всех ступеней ХП идеального АЦП, напряжение первого межкодового перехода  $U_1$  должно отстоять от напряжения 0В на величину, равную половине шага квантования ХП.

Для идеального АЦП ширина ступеньки равна шагу квантования:

$$Dx = (X_{max} - 0)/(2^n - 1).$$

Процесс квантования аналогового значения приводит к возникновению ошибки (шума) квантования  $dN_{tki}$ , максимальное значение которой  $\pm 1/2$  единицы младшего разряда ( $\pm 1/2$  EMP) преобразователя. Аналоговым эквивалентом этой ошибки является половина шага квантования  $Dx/2$ , которая и определяет статическую погрешность преобразования. На рис.2 приведен график ошибки квантования трехразрядного АЦП для нормированного входного сигнала.

Инструментальная погрешность АЦП (так же, как и ЦАП) обусловлена несовершенством отдельных элементов схемы и влиянием на них различных дестабилизирующих факторов. Инструментальная погрешность, как уже отмечалось ранее, приводит к тому, что ХП реальных АЦП отличаются от идеальной, приведенной на рис.2. Эти отличия заключаются в неидентичности шагов квантования, в расположении ХП относительно осей координат, в отклонении ХП от прямой, в неидеальности профиля межкодового перехода. Несоответствие идеальной и действительной характеристик преобразования определяет точностные параметры АЦП:

1. отклонение коэффициента преобразования от идеального значения;
2. напряжение смещения нуля;
3. нелинейность ХП;

Отклонение коэффициента преобразования от идеального значения можно характеризовать погрешностью преобразования в конечной точке ХП. Эта погрешность показывает изменение наклона прямой.

Действительное значение входного напряжения в точке ХП, соответствующей нулевому значению этого напряжения, определяет напряжение смещения нуля. Физически это напряжение показывает параллельный сдвиг ХП вдоль оси абсцисс.

Нелинейность АЦП — отклонение действительного значения входного напряжения, соответствующего заданной точке ХП, от значения, определяемого по идеальной ХП в той же точке. Этот параметр характеризует отклонение центров ступенек действительной ХП от прямой линии идеальной ХП.

Таким образом, с точки зрения статической точности работы, исчерпывающей характеристикой АЦП является его реальная характеристика преобразования.

### Последовательные АЦП

АЦП с единичным приближением

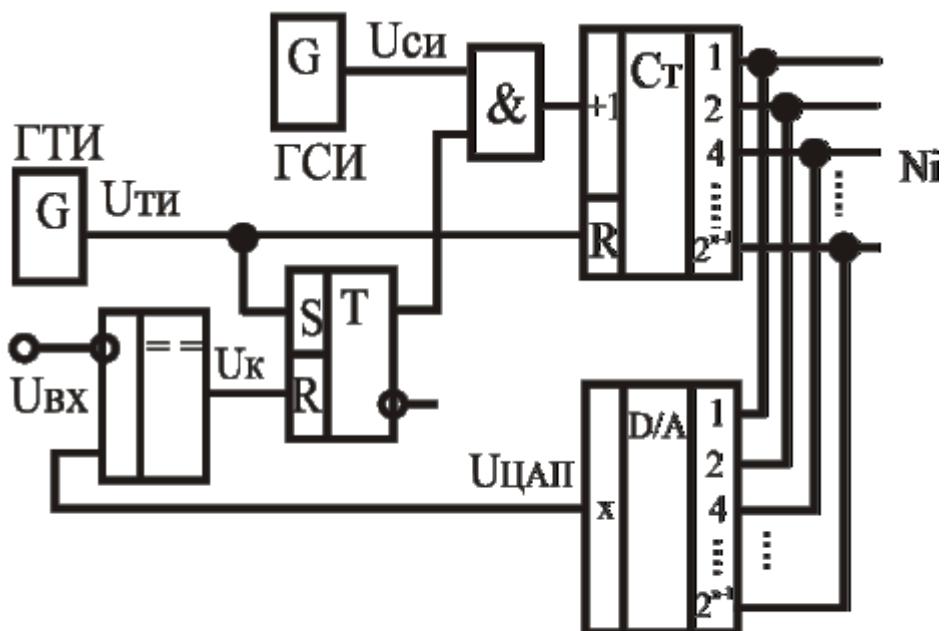
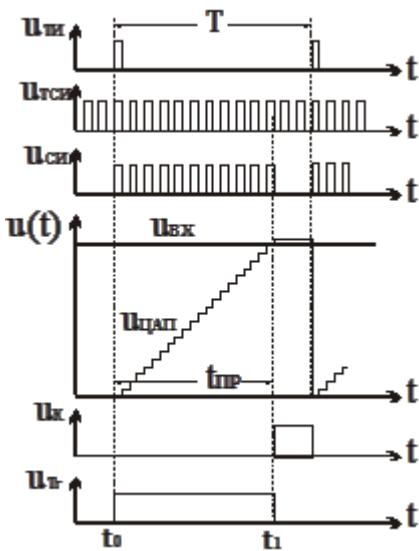


Рис. 4.

Типичная схема последовательного n-разрядного АЦП с единичным приближением представлена на рис. 4, а. В состав схемы включены следующие компоненты: генератор тактовых импульсов ГТИ, генератор счётных импульсов ГСИ, n-разрядный двоичный суммирующий счётчик СТ, n-разрядный ЦАП, аналоговый компаратор, RS-триггер и логический элемент И (конъюнктор).

$$u_k = \begin{cases} 0, & \text{если } u_{\text{ЦАП}} < u_{\text{вх}}, \\ 1, & \text{если } u_{\text{ЦАП}} > u_{\text{вх}}. \end{cases}$$

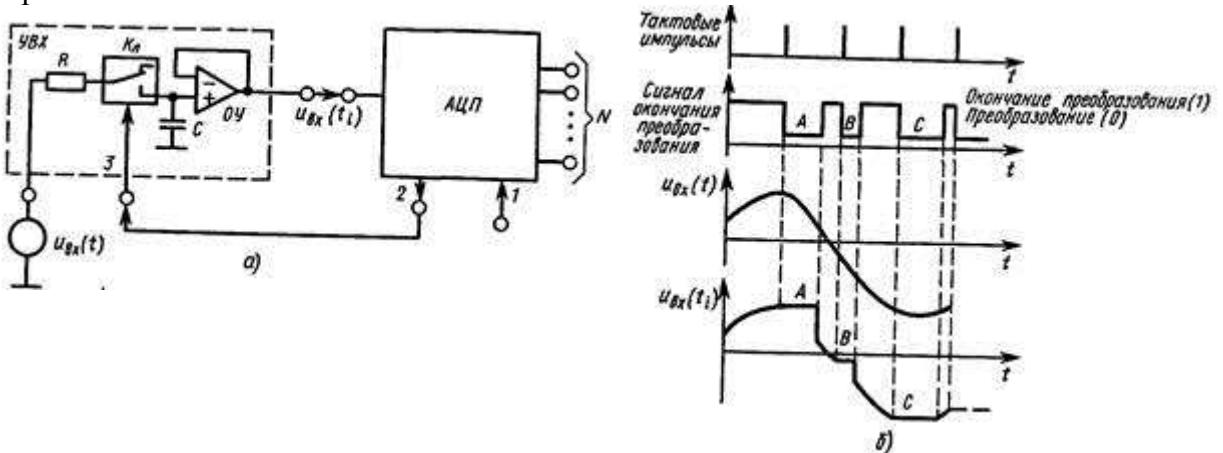


Статическая погрешность преобразования определяется в основном суммарной статической погрешностью используемых ЦАП и компаратора. Быстродействие рассматриваемого АЦП, характеризуемое временем преобразования, определяется числом разрядов  $n$  и частотой счетных импульсов  $f_{\text{сч}}$ . Время преобразования АЦП данного типа является переменным и определяется уровнем входного напряжения. Максимальное время преобразования, соответствующее максимальному входному напряжению,

$$t_{\text{ПР, max}} = (2^n - 1)Df_{\text{сч}},$$

где  $Df_{\text{сч}} = 1/f_{\text{сч}}$  — период следования счетных импульсов.

Так как число разрядов АЦП задается, время преобразования определяется частотой (периодом) счетных импульсов. Минимальный период импульсов  $Df_{\text{сч,min}}$  необходимо выбирать из условия установления за это время всех переходных процессов с заданной погрешностью.



При работе без УВХ динамическая погрешность, как уже отмечалось ранее, определяется временем преобразования АЦП, которое в данном случае играет роль апертурного времени. Учитывая невысокое быстродействие, АЦП данного типа без УВХ пригодны для работы только с медленно меняющимися сигналами, которые за цикл преобразования изменяются не более чем на значение шага квантования.

Рис.4. Схема (а) и временная диаграмма (б) совместной работы УВХ и АЦП

1 - тактовые импульсы (импульсы запуска); 2 - сигнал окончания преобразования, 3 - управляющий сигнал

Совместная работа АЦП рассматриваемого типа с УВХ, построенным по распространенной схеме, использующей сочетание накопительного конденсатора С, аналогового ключа  $K_l$  и операционного усилителя  $OY$ , показана на рис.4, а. По сигналу с генератора тактовых импульсов АЦП осуществляет преобразование сигнала  $u_{BX}(t_i)$ , который представляет собой выходной сигнал  $UBX$  (в режиме хранения). По окончании цикла преобразования формируется управляющий сигнал, который, воздействуя на ключ  $K_l$ , переводит  $UBX$  в режим выборки (слежения). На временной диаграмме (рис.4, б)  $A$ ,  $B$ ,  $C$  обозначают время преобразования АЦП.

## ГЛАВА 6. SCADA-системы

### Общие понятия и структура SCADA-систем

В настоящее время SCADA (SupervisoryControlAndDataAcquisition - диспетчерское управление и сбор данных) является наиболее перспективной технологией автоматизированного управления во многих отраслях промышленности.

В последние несколько десятилетий за рубежом резко возрос интерес к проблемам построения высокоэффективных и высоконадежных систем диспетчерского управления и сбора данных.

С одной стороны, это связано со значительным прогрессом в области вычислительной техники, программного обеспечения и телекоммуникаций, что увеличивает возможности и расширяет сферу применения автоматизированных систем.

С другой стороны, развитие информационных технологий, повышение степени автоматизации и перераспределение функций между человеком и аппаратурой обострило проблему взаимодействия человека-оператора с системой управления. Расследование и анализ большинства аварий и происшествий в промышленности и на транспорте, часть из которых привела к катастрофическим последствиям, показали, что, если в 60-х годах XX века ошибка человека являлась первоначальной причиной лишь 20% инцидентов, то в 90-х годах доля «человеческого фактора» возросла до 80%, причем, в связи с постоянным совершенствованием технологий и повышением надежности электронного оборудования и машин, доля эта может еще возрасти (рис 6..1).

## Рисунок 6. 1 Тенденции причин аварий в сложных автоматизированных системах.

Основной причиной таких тенденций является старый традиционный подход к построению АСУ, который применяется часто и в настоящее время: ориентация в первую очередь на применение новейших технических (технологических) достижений, стремление повысить степень автоматизации и функциональные возможности системы и, в то же время, недооценка необходимости построения эффективного человека-машинного интерфейса (HMI - Human-MachineInterface), т.е. интерфейса, ориентированного на оператора.

Возникла необходимость применения нового подхода при разработке таких систем, а именно, ориентация в первую очередь на человека-оператора (диспетчера) и его задачи. Реализацией такого подхода являются SCADA-системы, которые иногда даже называют SCADA/HMI.

Управление технологическими процессами на основе SCADA-систем стало осуществляться в передовых западных странах в 80-е годы XX века. В России переход к управлению на основе SCADA-систем стал осуществляться несколько позднее, в 90-е годы.

SCADA-системы наилучшим образом применимы для автоматизации управления непрерывными и распределенными процессами, какими являются нефтегазовые технологические процессы. Кроме нефтяной и газовой промышленности, SCADA-системы применяются в следующих областях:

- управление производством, передачей и распределением электроэнергии;
- промышленное производство;
- водозабор, водоочистка и водораспределение;
- управление космическими объектами;
- управление на транспорте (все виды транспорта: авиа, метро, железнодорожный, автомобильный, водный);
- телекоммуникации;
- военная область.

В мире насчитывается не один десяток компаний, активно занимающихся разработкой и внедрением SCADA-систем. Программные продукты многих из этих компаний представлены на российском рынке. Кроме того, в России существуют компании, которые занимаются разработкой отечественных SCADA-систем.

## Определение и общая структура SCADA

SCADA - это процесс сбора информации реального времени с удаленных объектов для обработки, анализа и возможного управление этими объектами.

В SCADA-системах в большей или меньшей степени реализованы основные принципы, такие, как работа в режиме реального времени, использование значительного объема избыточной информации (высокая частота обновления данных), сетевая архитектура, принципы открытых систем и модульного исполнения, наличие запасного оборудования, работающего в «горячем резерве» и др.

Все современные SCADA-системы включают три основных структурных компонента (рис.6.2).

Рисунок 6.2. Основные структурные компоненты SCADA-системы.

**RemoteTerminalUnit (RTU)** - удаленный терминал, осуществляющий обработку задачи (управление) в режиме реального времени.

**Системы реального времени бывает двух типов: системы жесткого реального времени и системы мягкого реального времени.**

*Системы жесткого реального времени* не допускают никаких задержек

Спектр воплощения RTU широк - от примитивных датчиков, осуществляющих съем информации с объекта, до специализированных многопроцессорных отказоустойчивых вычислительных комплексов, осуществляющих обработку информации и управление в режиме жесткого реального времени. Конкретная его реализация определяется конкретным применением. Использование устройств низкоуровневой обработки информации позволяет снизить требования к пропускной способности каналов связи с центральным диспетчерским пунктом.

**MasterTerminalUnit (MTU)** - диспетчерский пункт управления (главный терминал); осуществляет обработку данных и управление высокого уровня, как правило, в режиме мягкого реального времени. Одна из основных функций - обеспечение интерфейса между человеком-оператором и системой. MTU может быть реализован в самом разнообразном виде - от одиночного компьютера с дополнительными устройствами подключения к

каналам связи до больших вычислительных систем и/или объединенных в локальную сеть рабочих станций и серверов.

**CommunicationSystem (CS)** - коммуникационная система (каналы связи), необходима для передачи данных с удаленных точек (объектов, терминалов) на центральный интерфейс оператора-диспетчера и передачи сигналов управления на RTU.

### Функциональная структура SCADA

В названии SCADA присутствуют две основные функции, возлагаемые на системы этого класса:

- сбор данных о контролируемом процессе;
- управление технологическим процессом, реализуемое ответственными лицами на основе собранных данных и правил (критериев), выполнение которых обеспечивает наибольшую эффективность технологического процесса.

SCADA-системы обеспечивают выполнение следующих функций:

1. Прием информации о контролируемых технологических параметрах от контроллеров нижних уровней и датчиков.
2. Сохранение принятой информации в архивах.
3. Обработка принятой информации.
4. Графическое представление хода технологического процесса, а также принятой и архивной информации в удобной для восприятия форме.
5. Прием команд оператора и передача их в адрес контроллеров нижних уровней и исполнительных механизмов.
6. Регистрация событий, связанных с контролируемым технологическим процессом и действиями персонала, ответственного за эксплуатацию и обслуживание системы.
7. Оповещение эксплуатационного и обслуживающего персонала об обнаруженных аварийных событиях, связанных с контролируемым технологическим процессом и функционированием программно-аппаратных средств АСУТП с регистрацией действий персонала в аварийных ситуациях.
8. Формирование сводок и других отчетных документов на основе архивной информации.
9. Обмен информацией с автоматизированной системой управления предприятием.

## 10. Непосредственное автоматическое управление технологическим процессом в соответствии с заданными алгоритмами.

Данный перечень функций, выполняемых SCADA-системами, не является абсолютно полным, более того, наличие некоторых функций и объем их реализации сильно варьируется от системы к системе.

### Особенности SCADA как процесса управления

Существует два типа управления удаленными объектами в SCADA-системах: автоматическое и инициируемое оператором системы.

Процесс управления в современных SCADA-системах имеет следующие особенности:

- процесс SCADA применяется в системах, в которых обязательно наличие человека (оператора, диспетчера);
- процесс SCADA был разработан для систем, в которых любое неправильное воздействие может привести к отказу объекта управления или даже катастрофическим последствиям;
- оператор несет, как правило, общую ответственность за управление системой, которая при нормальных условиях только изредка требует подстройки параметров для достижения оптимальной производительности;
- активное участие оператора в процессе управления происходит нечасто и в непредсказуемые моменты времени, обычно в случае наступления критических событий (отказы, нештатные ситуации и пр.);
- действия оператора в критических ситуациях могут быть жестко ограничены по времени (несколькими минутами или даже секундами).

### **Основные требования к SCADA-системам и их возможности. Аппаратные и программные средства SCADA-систем**

#### Основные требования к SCADA-системам

К SCADA-системам предъявляются следующие основные требования:

- надежность системы;
- безопасность управления;
- открытость, как с точки зрения подключения различного контроллерного оборудования, так и коммуникации с другими программами;
- точность обработки и представления данных, создание богатых возможностей для реализации графического интерфейса;
- простота расширения системы;

- использование новых технологий.

Требования безопасности и надежности управления в SCADA-системах включают:

- никакой единичный отказ оборудования не должен вызвать выдачу ложного выходного воздействия (команды) на объект управления;
- никакая единичная ошибка оператора не должна вызвать выдачу ложного выходного воздействия (команды) на объект управления;
- все операции по управлению должны быть интуитивно- понятными и удобными для оператора (диспетчера)

### Основные возможности современных SCADA-пакетов

Исходя из требований, которые предъявляются к SCADA-системам, большинству современных пакетов присущи следующие основные возможности:

1. Автоматизированная разработка, позволяющая создавать ПО системы автоматизации без реального программирования.
2. Средства сбора и хранения первичной информации от устройств нижнего уровня.
3. Средства обработки первичной информации.
4. Средства управления и регистрации сигналов об аварийных ситуациях.
5. Средства хранения информации с возможностью ее постобработки (как правило, реализуется через интерфейсы к наиболее популярным базам данных).
6. Средства визуализации информации в виде графиков, гистограмм и т.п.

### Тенденции развития аппаратных и программных средств SCADA-систем

#### Общие тенденции

Прогресс в области информационных технологий обусловил развитие всех 3-х основных структурных компонент систем диспетчерского управления и сбора данных - RTU, MTU и CS, что позволило значительно увеличить их возможности; так, число контролируемых удаленных точек в современной SCADA-системе может достигать 100 000 и более. На настоящий момент значение данного параметра практически не имеет ограничений.

Основная тенденция развития технических средств (аппаратного и программного обеспечения) SCADA - миграция в сторону полностью открытых систем. Открытая архитектура позволяет независимо выбирать различные компоненты системы от различных производителей; в результате - расширение функциональных возможностей, облегчение обслуживания и снижение стоимости SCADA-систем.

## **Литература:**

1. Петров, И. В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования [Электронный ресурс] : учеб. пособие / И. В. Петров ; ред. В. П. Дьяконов. – М. : СОЛООН-ПРЕСС, 2010. - 254 с.
2. Сырецкий, Г. А. Проектирование автоматизированных систем. Ч. 1 [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Г.А. Сырецкий. - Новосибирск : НГТУ, 2014. - 156 с.

дополнительная литература:

1. Астайкин, А. И. Теоретические основы радиотехники. Ч. 2. Основы теории сигналов [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А. И. Астайкин, А. П. Помазков. – Саров : РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2004. - 335 с.
2. Герасимов, А. В. Программируемые логические контроллеры [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А. В. Герасимов, И. Н. Терюшов, А. С. Титовцев. – Казань : КГТУ, 2008. - 169 с.
3. Денисенко, В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием [Электронный ресурс] / В. В. Денисенко. – М. : Горячая линия-Телеком, 2013. - 606 с.
4. Смирнов, С. В. Методы и оборудование контроля параметров технологических процессов производства наногетероструктур и наногетероструктурных монолитных интегральных схем [Электронный ресурс] : учеб. пособие / С. В. Смирнов. - Томск : ТУСУР, 2010. - 115 с.