

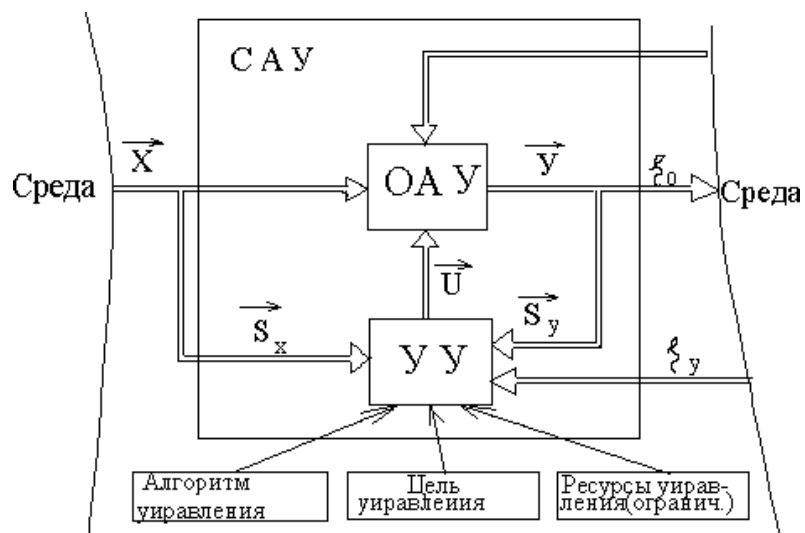
Составитель: док. тех. наук., профессор И.П. Добролюбов

Рецензент к.т.н., доцент И.С. Тырышкин

Программируемые системы управления: Учебное пособие. / Добролюбов И.П. – Новосибирск: Новосиб. гос. аграр. ун-т. Инженерный ин-т. 2017.- 302 с.

**ПРОГРАММИРУЕМЫЕ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ



Рассмотрены основные положения теории компьютерных (микропроцессорных) программируемых систем управления. Рекомендовано к использованию для самостоятельной работы студентов.

Предназначены для студентов очной и заочной форм обучения по направлению подготовки 35.03.06 Агроинженерия (профиль Электрооборудование и электротехнологии в агропромышленном комплексе).

Утверждены и рекомендованы к изданию учебно-методическим советом Инженерного института (протокол №5 от 12 декабря 2017 г.).

© Добролюбов И.П., 2017

© Новосибирский государственный аграрный университет 2017

Введение

Устойчивое развитие сельского хозяйства во многом определяется рациональным использованием имеющихся ресурсов, привлечением в полной мере действующих экономических механизмов. Это требует более точного и жёсткого учёта ресурсов, снижения потерь сырья и продукции, выявления наиболее благоприятных (эффективных) условий производства, протекания технологических процессов с максимально возможным ресурсо- и энергосбережением. Таким образом, необходимо осуществлять оптимальное (наиболее эффективное по технико-экономическому критерию) управление сельскохозяйственным производством. Отличительной особенностью управления этим производством является принятие решений в условиях неопределённости, вызванной влиянием множества внешних и внутренних факторов различной природы (физических, химических, биологических, экологических, социальных и др.). Кроме того, для сельского хозяйства характерно более слабое использование, в сравнении с другими отраслями, средств автоматизации, информатизации, роботизации.

Быстрое развитие и совершенствование средств вычислительной (микропроцессорной) техники привело к широкому использованию их в различных отраслях народного хозяйства. Перспективным направлением повышения эффективности сельского хозяйства является широкое внедрение гибкого автоматизированного производства, способного оперативно адаптироваться к изменяющимся технологическим операциям, режимам, сырью и т.д., охваченного построенными на базе микропроцессорной техники локальными системами автоматизированного и автоматического управления, регулирования, защиты, контроля и др., а также управляющими устройствами, обеспечивающими непрерывное оперативное изменение состояния регулирующих органов объектов автоматического управления.

Настоящее учебное пособие поможет студентам агроинженерных специальностей изучить основы построения и практического применения компьютерных (микропроцессорных) систем управления, применяемых, в том числе и в сельскохозяйственном производстве.

Тема 1. Общие принципы управления с применением средств автоматизации.

1.1. Основные термины и определения

Управление технологическими процессами (ТП) – комплекс мероприятий, обеспечивающих достижение цели, т.е. повышение эффективности ТП в соответствии с заданными целевыми условиями, выбранным критерием оптимальности при заданных технологических, экономических и других производственных ограничениях.

Комплекс указанных мероприятий состоит из сбора, анализа информации о ТП и осуществлении на её основе контроля и регулирования ТП с помощью технических средств автоматизации и методов организации и управления.

Критерий – мера, определяющая близость к цели.

Решение задач автоматизации неразрывно связано с такими понятиями, как объект автоматического (автоматизированного) управления и система управления, цель и алгоритм управления.

Объект автоматического или автоматизированного управления (ОАУ) – часть окружающего мира (среды), выделенная таким образом, что выполняются, по крайней мере, два условия: 1) на объект можно воздействовать; 2) это воздействие может приблизить нас к осуществлению поставленных целей в объекте, т.е. изменить его состояние в желательном для нас направлении.

Цель управления – совокупность условий, свойств и требований, которым должен удовлетворять объект управления.

Алгоритм управления – совокупность правил, методов и способов, позволяющих образовать (синтезировать) целенаправленное воздействие (управление), если известно действительное состояние объекта управления, т.е. это инструкция о том, как добиться цели управления в различных ситуациях. Иногда его называют законом управления.

Система – множество взаимосвязанных элементов, составляющих единое целое.

Элемент системы – составная часть, подсистема (нижнего уровня), внутрь которых описание не проникает.

Технические системы делятся на 2 класса: терминальные и целенаправленные.

Терминальная система – отсутствие цели.

Целенаправленная система – имеет цель (множество целей) и содержит, как правило, механизм достижения цели.

Автоматизация ТП связана с исследованием целенаправленных систем, а технические средства управления составляют основу механизма достижения цели.

Системы управления ТП относятся к классу сложных систем ввиду наличия множества целей, элементов и связей между ними, множество управляющих и возмущающих воздействий, выходных реакций системы.

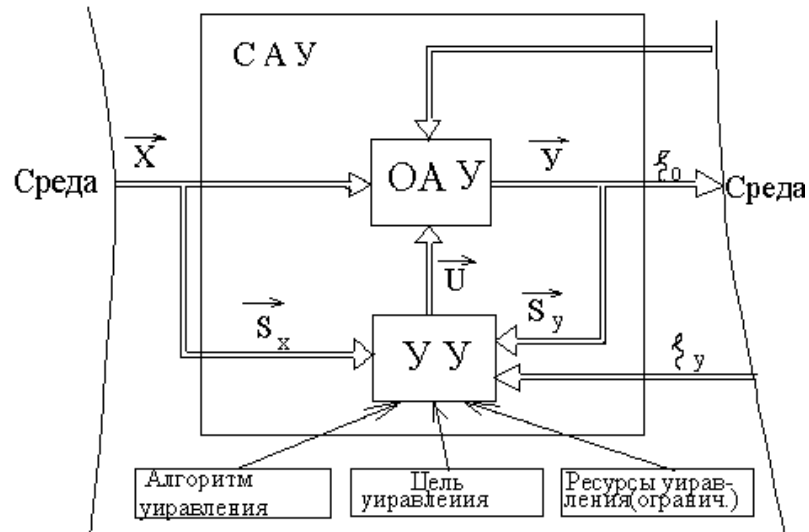


Рис.1.1. Структура системы автоматического управления

Система автоматического (автоматизированного) управления – совокупность объекта управления и управляющего устройства, процесс взаимодействия которых приводит к выполнению поставленной цели управления (рис.1.1). На рис.1.1 обозначено: $\vec{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ - множество (вектор) воздействий среды на объект; $\vec{Y} = \{y_1, y_2, \dots, y_k\}$ - множество (вектор) воздействий объекта на среду; $\vec{U} = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ - множество (вектор) воздействий УУ на ОАУ; $\vec{S}_x = \{s_{x1}, s_{x2}, \dots, s_{xr}\}$ - множество (вектор) информативных признаков о состоянии среды; $\vec{S}_y = \{s_{y1}, s_{y2}, \dots, s_{ys}\}$ - множество (вектор) информативных признаков о состоянии ОАУ; $\vec{\xi}_0, \vec{\xi}_y$ -

множества (векторы) помех, воздействующих на ОАУ и УУ (возмущения).

Таким образом, S_x, S_y, U , цель и алгоритм управления - необходимые атрибуты системы управления.

Всякое управление имеет экстремальный характер. При этом оно имеет две стороны. Во-первых сама цель управления может быть экстремальной, т.е. задачей управления является достижение экстремума некоторого функционала или функции, которые определены на состояниях объекта. Нужно перевести объект в такое состояние, в котором этот функционал достигает экстремума (получить модель, наименьшим образом отличающуюся от объекта, добиться наилучшего качества определённого процесса и т.д.). Во-вторых, экстремальность управления связана с необходимостью снижения ущерба и потребителю (среде). Это прежде всего затраты потребителя на организацию системы управления (выделение объекта управления, выявление и организация каналов взаимодействия внутри системы, формулировка цели, синтез алгоритма и т.д.). Кроме того, в процессе управления управляющие воздействия вносят в объект дополнительные изменения (раскачку). И может оказаться, что ущерб от этих изменений превышает выигрыш от управления. В этом случае оно просто вредно. Поэтому должна быть поставлена дополнительная цель о максимальной эффективности управления. Таким образом, экстремальность управления определяется как экстремальностью целей управления, так и экстремальностью самого процесса управления, т.е. процесс управления должен быть оптимальным в каком-то определённом смысле. Это означает, что к основной цели управления (выполнять совокупность условий, свойств и требований, которым должен удовлетворять объект) добавляется дополнительная экстремальная цель – добиться этого наилучшим образом (например, оперативнее всего, надёжнее, точнее и т.д.). Эта экстремальная цель поставлена на другом иерархическом уровне управления.

Общие принципы построения САУ

Важнейшими принципами функционирования систем являются иерархичность, композиция и декомпозиция элементов системы:

Иерархичность – подчинённость и соподчинённость частей системы;

Композиция – объединение элементов в блоки, устройства, подсистемы и рассмотрение их как единого целого;

Декомпозиция – разбиение сложной системы на подсистемы, блоки, узлы и т.д.

Используя эти принципы всякую систему можно разбить на ряд иерархических уровней, каждый из которых может содержать ряд частей (подсистем, устройств, блоков и т.д.). Особое внимание при этом следует уделять обоснованию критерия качества каждой подсистемы. Иначе система, оптимальная в смысле её критерия качества, может оказаться далеко не оптимальной или вообще неприемлемой с точки зрения качества системы в целом.

Иерархическая система управления, решающая поставленную задачу (рис.1.2), состоит из 2-3 уровней (иногда больше). Органами управления, на которые воздействует 1-й уровень, являются цель, алгоритм и ограничения, накладываемые на 2-й уровень. Этим осуществляется коррекция цели и алгоритма 2-го уровня, чтобы эффективность управления этого уровня была максимальной. Кроме того, 1-й уровень может воздействовать непосредственно на 2-й с целью максимизации эффективности его функционирования (например, оптимизируя процесс сбора и обработки информации). Эффективность работы системы управления 3-го уровня может управляться системой управления 2-го уровня, цель которой – оптимизация функционирования 3-го уровня и т.д. Иерархия создаётся поуровневой факторизацией процессов $\{F_i\}$ при помощи обобщённых параметров $\{Q_i\}$, являющихся функционалами $\{F_i\}$. Эффективность сложной системы (например, механизированного сельскохозяйственного процесса), т.е. её целевая функция, зависит от n процессов $\{F_i^{(j)}\} = F_1^{(j)}, F_2^{(j)}, \dots, F_n^{(j)}$ 1-го уровня: $\mathcal{E}_S = \mathcal{E}_S(\{F_i^{(j)}\})$, $i = \overline{1, m}$. Процессы $\{F_i^{(j)}\}$ – это процессы взаимодействия системы со средой, т.е. это весь комплекс мероприятий с первого $F_i^{(j)}$ по p -й блоки $F_p^{(j)}$ (блоки технологических, технических, организационных и социальных мероприятий, проводимых в производственном процессе). Они определяются параметрами системы 1-го уровня $\{Q_j^{(1)}\}$, $j = \overline{1, n}$ и параметрами среды $\{0_k^c\}$, препятствующими выполнению системой заданных функций (ограничениями, накладываемыми средой), т.е. $F_i^{(j)} = F_i^{(j)}(\{Q_j^{(1)}\}, \{0_k^c\})$.

Параметры среды имеют непосредственный контакт с подсистемами низших уровней, взаимодействуя через них на подсистемы более высокого уровня, поэтому процессы на любом из уровней зависят от среды (под контактами со средой в данном случае понимаются входные и управляющие воздействия, выходная реакция).

Параметры системы 1-го уровня $\{Q_j^{(1)}\}$ зависят от процессов в системе 2-го уровня:

$$Q_j^{(1)} = Q_j^{(1)}(\{F_u^{(2)}\}, u = \overline{1, M}, j = \overline{1, n}).$$

Они записываются в виде функционалов состояния

$$Q_j^{(1)} = \int \dots \int \{F_u^{(2)}(\xi) dG_u(\xi t)\} = Q_j^{(1)}(t),$$

где G_u – некоторая функция.

Процессы $\{F_u^{(2)}\}$ 2-го уровня зависят от параметров $Q^{(2)}$ подсистем второго уровня $Q^{(2)} = \{Q_j^{(2)}\}, j = \overline{1, l}: F_u^{(2)} = F_u^{(2)}(\{Q_j^{(2)}\})$ и т.д.

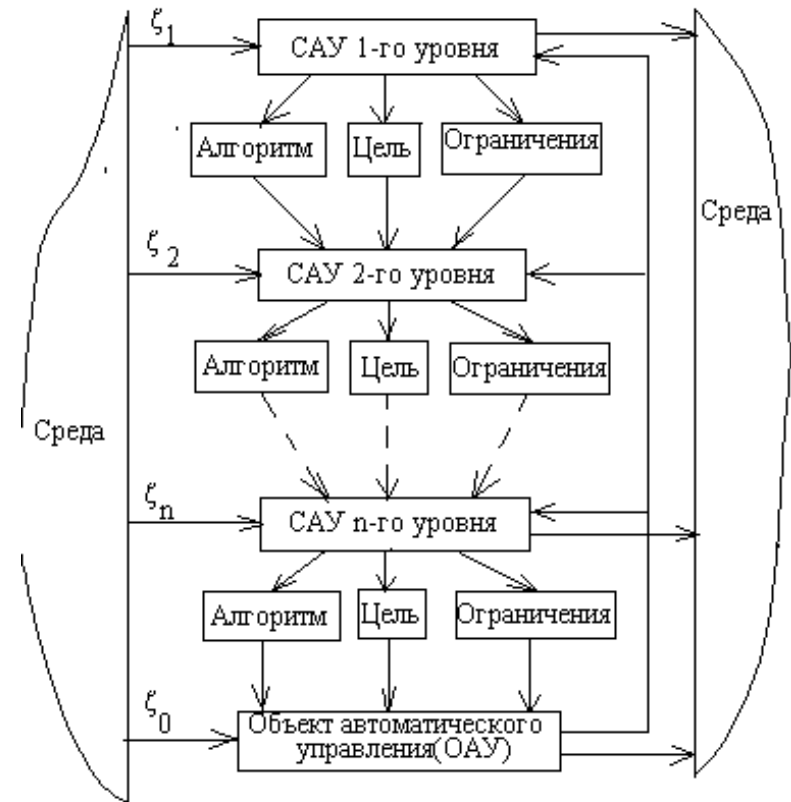


Рис.1.2. Иерархическое построение систем автоматического управления

На самом нижнем уровне иерархии САУ находится ОАУ, параметры (показатели качества) которого $q_j^{OAV} = \{q_j^{OAV}\}$ зависят от процессов в ОАУ: $q_j^{OAV} = q_j^{OAV}(F_u^{OAV})$, $u=1, N, j=1, r$.

Образуется следующая иерархия описания: эффективность – процессы 1-го уровня (функции) – параметры 1-го уровня (функционалы) – процессы 2-го уровня (функции) – параметры 2-го уровня (функционалы) и т.д.

Точность оценки параметров $Q_j^{(l)}$, а следовательно и эффективность системы зависят от числа уровней иерархии и от точности представления параметров или процессов на нижнем уровне (на уровне обрыва иерархии). Взаимодействие системы с подсистемами (нижнего уровня иерархии) в технических системах должно осуществляться на основе принципа полного согласованного взаимодействия:

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{E}_{\Sigma}(S) &= \sum b_i \mathcal{E}_i; \\ \text{extr } \mathcal{E}_{\Sigma}(S) &= f[\text{extr } \mathcal{E}(S_i)] \end{aligned} \right\}$$

где $S = \bigcup_{i=1}^n S_i$; $S_i \in S$; $\mathcal{E}_{\Sigma}(S)$ – суммарная эффективность системы;

$\mathcal{E}(S_i)$ – эффективность i -й подсистемы; $\bigcup_{i=1}^n$ объединение (дизъюнкция) подсистем; b_i – весовые коэффициенты.

Рассмотрение системы может быть полным только при наличии функционального, информационного и морфологического описаний (обеспечений).

Функциональное описание (математическая модель) рассматривает процессы в системе, т.е. определяет функции, для выполнения которых служит система (это оператор преобразования воздействий на входе системы в результат на её выходе), оно иерархично. Это описание включает в себя также функционал эффективности (целевую функцию), который количественно и качественно описывает деятельность системы.

Информационное обеспечение должно давать сведения об организации системы, т.е. о её способности принимать, обрабатывать, хранить, передавать и отражать сведения, данные, сообщения, команды, сигналы.

Морфологическое описание (состав элементов, связи, структура, композиция) должно дать представление о строении системы (о её техническом обеспечении) и также иерархично. Конкретизация мор-

фологии даётся на стольких уровнях, сколько их требуется для описания основных свойств системы.

В самом общем виде САУ можно представить в виде схемы (рис.1.3). Алгоритм управления можно обобщённо рассматривать как циклический процесс последовательного обращения к 2 операторам – идентификации и принятия решений (рис.1.3.б). Оператор идентификации осуществляет сбор и обработку информации о поведении ОАУ и сравнение его с моделью, т.е. с тем идеальным функциональным описанием ОАУ, которое должна обеспечивать САУ. Эта информация используется для принятия решений на следующем этапе управления. В процессе идентификации поступает информация \vec{Y} о реакции объекта на управление \vec{U} и тестовое воздействие \vec{U}^* , выделенное из \vec{U} . Процесс идентификации заключается в наиболее точной оценке действительного оператора A по наблюдениям входов и выходов объекта (смотри тему 2, п.2.1).

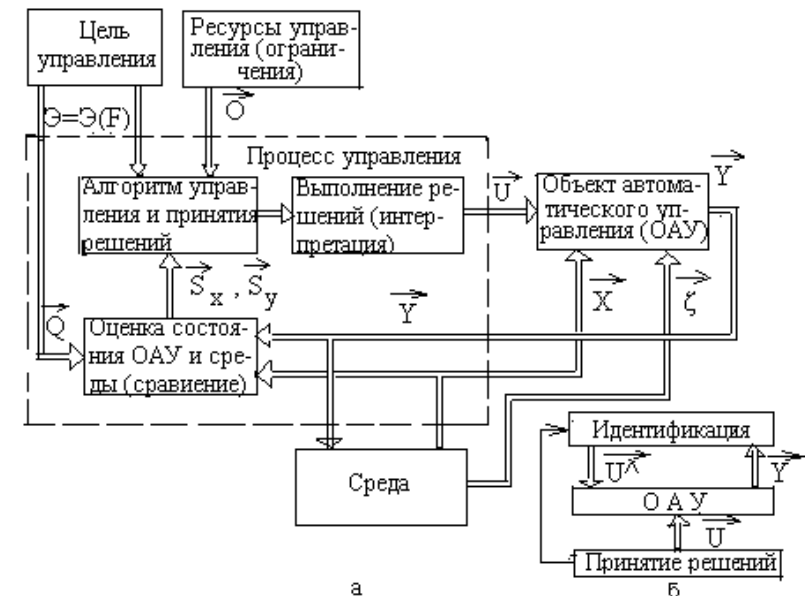


Рис.1.3. Структура процесса управления в системе автоматического управления

Всякий элемент системы, как и саму систему можно представить в виде (рис.1.4): $y=A(x)$ или $\vec{y}=A(\vec{X})$, где $\vec{y}=\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ –

отклик (реакция) системы на воздействия; $\vec{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ – входное воздействие; $\vec{\xi} = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n\}$ – возмущающее воздействие.

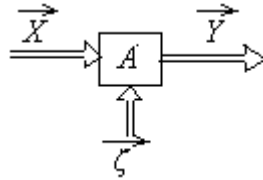


Рис. 1.4. Структура системы

Эффективность этапа идентификации определяется оператором \mathcal{E}_u , который достигает минимума:

$$\mathcal{E}_u(A, A_m) \rightarrow \min E_u[\vec{y}(t), \vec{y}_m(t)]; A_m \in \Omega$$

при полной идентичности оператора объекта A и модели A_m . Здесь E_u определяет близость откликов объектов \vec{y} и модели \vec{y}_m (в простейшем случае $E_u = \vec{y} - \vec{y}_m$). Так как оператор A обычно точно известен, то при идентификации A и A_m заменяют на \vec{y} и \vec{y}_m :

$$\mathcal{E}_u(\vec{y}, \vec{y}_m) \rightarrow \min (\bar{U}_m = \text{var} \in \Omega), A_m \in \Omega,$$

где выражение в скобках означает, что вариация управления \bar{U}_m ограничена некоторой областью Ω , т.е. некоторым множеством допустимых тестовых воздействий.

Целью оператора принятия решений является синтез управляющего воздействия \vec{U} , которое переводит объект управления в состояние, наименьшим образом отличающиеся от требуемого:

$$\mathcal{E}_F(\vec{y}, \vec{y}_m) \rightarrow \underset{\vec{U} \in \Omega}{\text{extrem}} \text{ или } \mathcal{E}_F([A_m(\vec{x}, \vec{U}), Z_y^*(\vec{y}, \vec{x}, \vec{U})]) \rightarrow \underset{\vec{U} \in \Omega}{\text{extrem}}, \text{ где}$$

$Z_y^*(\vec{y}, \vec{x}, \vec{U})$ - цель управления.

При разработке системы экстремального автоматизированного управления необходимо создать новую последовательность действий, которая обеспечивала бы наилучший режим управления объектом. Для этого необходимо уметь распознавать состояния объекта экстремального автоматизированного управления и квалифицировать эти состояния так, чтобы знать какое из двух состояний следует считать лучше другого, используя ту или иную меру (критерий) качества (эффективности) управления. Качество системы количественно, как пра-

вило, измеряется вектором показателей качества, зависящим от состояния управляемых параметров ОАУ q_1, q_2, \dots, q_n :

$$\vec{Q} = \vec{Q}\{q_1, q_2, q_n\} = \vec{Q}(\{\vec{Q}_\phi\}, \{\vec{Q}_u\}, \{\vec{Q}_m\}),$$

где $\vec{Q}_\phi = \{q_{\phi i}\}$, $\vec{Q}_u = \{q_{uj}\}$, $\vec{Q}_m = \{q_{mk}\}$ - соответственно векторы параметров, характеризующих функциональное, информационное и морфологическое обеспечение системы.

Цель экстремального автоматизированного или автоматического управления объектом следующая:

$$\vec{Q} = \vec{Q}\{q_1, q_2, \dots, q_n\} \rightarrow \underset{q_1, \dots, q_n \in S}{\text{extrem}},$$

где S – область допустимого изменения управляемых параметров.

Важнейшими обобщенными функциональными показателями качества САУ являются: точность описания ОАУ, характеризующаяся показателем близости (идентичности) модели и самого объекта $E_u = [\vec{y}(t) - \vec{y}_m(t)]$, оптимальность принятия решения об управлении, характеризующаяся показателем близости принятого решения к оптимальному $E_p = \vec{U}(t) - \vec{U}_m(t)$. Имеем $Q_\phi = \{E_u, E_p\}$. При разработке системы необходимо обосновать указанные меры близости, а также критерии эффективности идентификации и принятия решений.

Аналогичными информационными показателями $\{Q_u\} = \{V_c, I_c, C_c, \delta_u, Q_n, v_u\}$ являются: информативность, характеризующаяся объемом извлекаемой информации V_c , количеством информации I_c и пропускной способностью системы C_c ; точность и достоверность извлекаемой информации, характеризующаяся метрологическими показателями (погрешностью δ_u) и показателями помехоустойчивости (отношением сигнал/помеха Q_n), скорость изменения (генерирования) информации v_u .

Важнейшим показателем качества технического обеспечения является сложность, определяемая множеством составных элементов $\vec{\Sigma} = \{\Sigma_i\}$ и их свойствами, множеством связей $\vec{V} = \{v_i\}$, структурой σ , композицией K , т.е. определяемая полным морфологическим описанием системы $S_M = (\{\vec{\Sigma}, \vec{V}, \sigma, K\}; \{\vec{O}_M\})$. Другими показателями качества технического обеспечения являются: надежность, универсальность, оперативность, мобильность, стоимость C_m . При разработке технического обеспечения САУ вводятся ограничения \vec{O}_M : например, для $\vec{\Sigma} = \{\Sigma_i\}$ – состав элементов смешанный или однородный, свойства элементов – информационные, информационно-

энергетические или вещественные: для $\vec{V} = \{v_i\}$ – связи информационные, энергетические или вещественные, прямые или обратные; для σ – структура детерминированная или вероятностная, построения иерархические или смешанные; для K : с рецепторными подсистемами (элементами), преобразующими внешнее воздействие в информационные сигналы, обрабатывающие и переносящие информацию, или с эффекторными подсистемами, переносящими вещество, энергию и т.д.

Для автоматических САУ применение эффекторных подсистем (элементов), преобразующих воздействие в энергию и воздействующих с её помощью на другие системы или ОАУ (например, с помощью исполнительных механизмов) зачастую является необходимым. Количественным обобщённым показателем сложности может служить также, например, число элементов, блоков, подсистем; надёжности – вероятность безотказной работы P_{oi} (или наработка на отказ); универсальности – наличие процессорного блока обработки информации (микропроцессорных систем), оперативности – длительность проведения контроля T_k (скорость обработки V_s), мобильности – габариты и масса (G). Тогда имеем показатели качества технического обеспечения: $\{Q_T\} = \{S_M, P_{oi}, v_s, G, C_m\}$.

Учёт всех показателей качества (даже обобщённых) практически неосуществим. Нахождение результирующего обобщённого показателя $Q_{рез} = f_p \{Q_1, Q_2, \dots, Q_k\}$ для всех параметров $Q_{ф}, Q_{и}, Q_{м}$ – также весьма трудная задача, поэтому используют частные обобщённые показатели, определяемые из выражений: $\bar{Q}_{рез} = \bar{Q}_1, \dots, \bar{Q}_r$ или $\bar{Q}_{рез} = \sum_i \bar{Q}_i$ при накладываемых ограничениях $\{O_k\}$. Хотя таким образом нельзя получить глобальный экстремум целевой функции САУ, однако согласно свойству полного согласованного взаимодействия удастся получить практически оптимальную (рациональную) систему.

Задачи, решаемые при создании САУ и их функционировании

Создание и функционирование любой САУ связано с необходимостью решения следующих задач.

1. Сформулировать цель управления и выбрать показатели эффективности работы САУ.

2. Разработать математическое описание (модель) ОАУ, адекватно отражающую его свойства, состояние, переход из одного состояния в другое, а также его поведение при изменении показателей качества.

3. Выявить закономерности, связывающие структурные параметры ОАУ, характеризующие его свойства, с оперативно определяемыми с помощью САУ (преимущественно косвенными) параметрами физических, химических и других процессов, которые достоверно отражают свойства, состояние и поведение ОАУ.

4. Дать математическое (функциональное) описание сигналов, несущих наибольшее количество информации об ОАУ (информативных сигналов). Оценить чувствительность сигналов к изменению состояния ОАУ, определить информационные параметры сигналов (количество информации, скорость её изменения, вид и др.).

5. Обосновать методы, способы, алгоритмы и технические решения при создании САУ, которые обеспечивают извлечение точной и достоверной информации о состоянии ОАУ, предоставляют необходимую информацию для управления и осуществляют непосредственно управление (регулирование), т.е. создать информационное, морфологическое (структурное) и техническое (включающее алгоритмическое, программное и метрологическое) обеспечение САУ.

6. Обосновать показатели качества САУ, критерии их оценки и оптимизации.

1.2. Классификация систем автоматизации, их назначение и краткое описание

Все средства автоматизации могут функционировать только в составе той или иной системы автоматизации. Поэтому их принцип действия и сущность решаемой ими задачи может оценить, только рассматриваемая взаимодействия средств автоматизации в рамках системы. По мере развития средств автоматизации совершенствовалась и дополнялась классификация систем автоматизации. Современная классификация предполагает деление систем по ряду признаков классификации и представлена на рис. 1.5. В соответствии с этой схемой рассмотрим последовательно назначение систем автоматизации.

Системы автоматического (автоматизированного) контроля (САК)

Контроль – процесс получения информации о состоянии ОАУ.

Задачи САК:

а) измерение параметров ОАУ; б) сравнение текущих значений параметров с допустимыми значениями; в) регистрация (фиксация, индентификация, документирование) значений параметров и их текущих отклонений от заданных значений (уставок); г) поиск мест

неисправностей; д) прогнозирование изменения параметра; е) предупреждение о появлении предаварийных и аварийных ситуаций; ж) информирование человека-пользователя САК.

Показатели качества САК:

1) число контролируемых точек n_k ОАУ; 2) универсальность; 3) точность измерения параметров - σ ; 4) быстродействие; 5) способ выбора точек контроля; 6) расстояние от ОАУ до САК; 7) вид обрабатываемых сигналов; 8) наличие микроЭВМ или микропроцессорных систем; 9) глубина контроля.

Системы автоматической сигнализации (САС)

САС предупреждают о появлении отклонений текущих значений параметров от наперед заданных значений с помощью звуковых или световых сигналов. По характеру информации может быть *технологическая САС* о состоянии оборудования. По назначению САС могут быть *рабочими, предупреждающими и аварийными*. Рабочие САС - информируют о ходе рабочего ТП в виде сигналов «норма», «выше нормы», «ниже нормы». *Предупреждающие САС* информируют о возможности предстоящего нарушения ТП. *Аварийные САС* - сигнализируют о грубых нарушениях ТП.

Системы автоматической защиты (САЗ), регулирования (САР) и управления (САУ)

САЗ предназначены для защиты ОАУ при возникновении критических нештатных ситуаций и обеспечивают полное отключение или ограничение входных и выходных сигналов ОАУ. В отличие от САС они имеют исполнительные устройства для осуществления воздействий на ОАУ.

САР предназначены для поддержания изменения значений параметров функционирования ОАУ по определенному жестко заданному закону или в установленных пределах: например, П-регулятор: $y = kx$.

САК, САС, САЗ и САР являются частными случаями САУ.

САУ наиболее многогранна. Для нее обязательным является наличие ограничений и алгоритма управления, определяющих структуру и свойства ОАУ и процесса управления.

Классификация САУ по степени автоматизации

При *частичной автоматизации* строятся локальные САУ быстропротекающими или высокоточными процессами, или отдель-

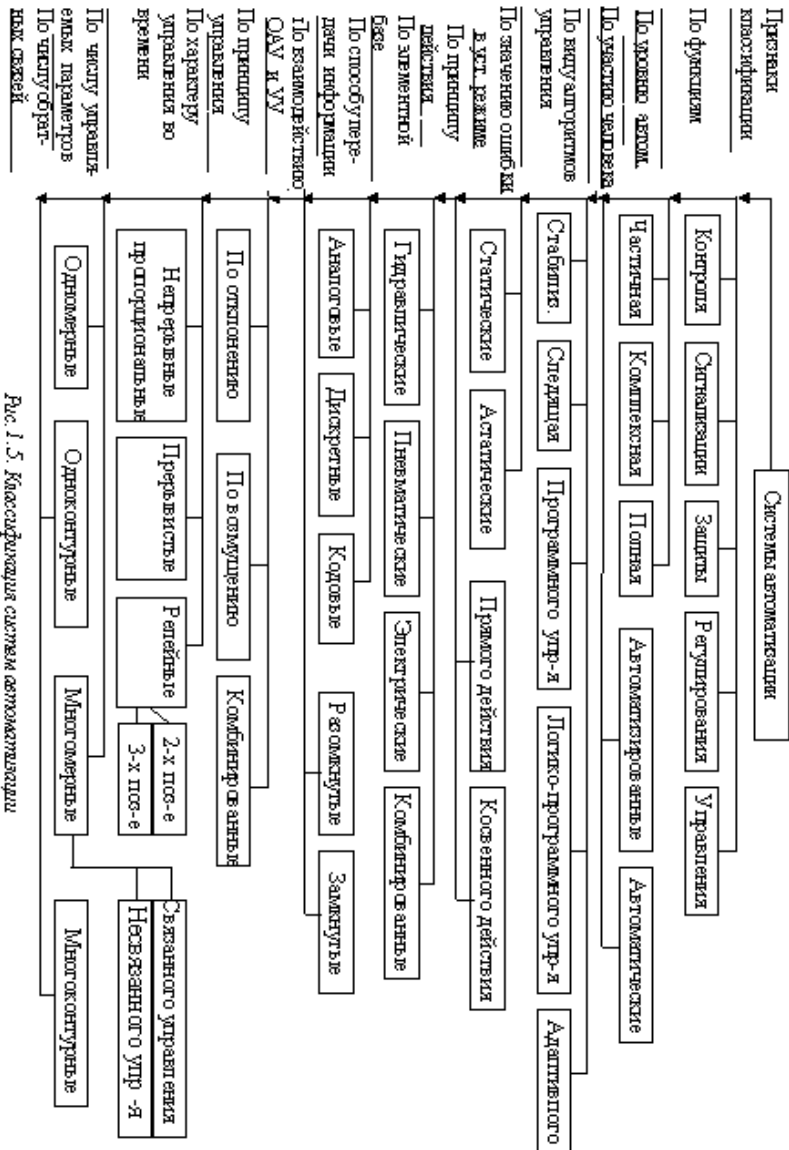


Рис. 1.5. Классификация систем автоматизации

ными механизмами, агрегатами. При *комплексной автоматизации* охватывается вся технологическая цепочка (поточная линия) - как объект автоматического управления. При *полной автоматизации* ТП протекает автоматически. Человек выполняет функции контроля и наблюдения.

Комплексная и полная автоматизация невозможны без применения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП), построенных на базе ЭВМ и микропроцессорных систем (МПС).

АСУ ТП - организационно-техническая система управления ТП в соответствии с принятым критерием и целью управления. Роль человека в АСУ ТП сводится к выработке и принятию решения там, где задачи принятия решения не могут быть формализованы и их выполнение не может быть полностью автоматизировано.

Комплекс технических средств АСУ ТП включает также средства и САУ локального контроля, сигнализации и регулирования, которые могут функционировать автономно.

АСУ ТП предназначены для выработки и осуществления управляющих воздействий на *технологический объект управления* - совокупность технологического оборудования, на котором выполняется технологический процесс (технологические аппараты, агрегаты и установки, а также участки, цеха и технологические комплексы по производству продукции в целом).

Технологический комплекс совместно с АСУ ТП образуют *автоматизированный технологический комплекс (АТК)*.

По уровню, занимаемому АСУ ТП в организационно-производственной структуре предприятия, различают три класса АСУ ТП: нижнего уровня, верхнего и многоуровневые. Системы *нижнего* уровня управляют технологическими агрегатами, установками, участками. Системы *верхнего* уровня (централизованные) управляют группами технологических установок, участками, производствами и не включают в себя АСУ ТП нижнего уровня. Системы *многоуровневые* управляют теми же процессами, что и АСУ ТП верхнего уровня, но включают в себя также АСУ ТП нижнего уровня.

Задачи, выполняемые АСУ ТП: а) централизованный контроль ТП; б) анализ производственной ситуации, расчет и выдача рекомендаций технологу-диспетчеру; в) непосредственное управление от ЭВМ технологическими агрегатами и участками; г) расчет и выдача уставок (задающих воздействий) регуляторам локальных САУ; д) расчет и управление технологическим потоком по отдельным участкам и про-

изводству в целом; е) расчет технико-экономических показателей за час, смену или по вызову.

К классу *АСУ предприятием (АСУП)* четвертого уровня относятся системы управления отдельными предприятиями и производственными объединениями. АСУП состоит из ряда самостоятельных АСУ (подсистем), выделяемых по функциональному, структурно-организационному и другим признакам.

Задачи АСУП: 1) автоматизированный сбор и обработка информации с широким использованием методов оптимизации по основным задачам и подсистемам управления всего предприятия и внутрицеховых уровней; 2) хранение в памяти ЭВМ и комплексное использование нормативно-справочной промежуточной и выходной информации в процессе решения задач управления; 3) организация рационального оборота документов внутри цехов и предприятия в целом.

В АСУП автоматизируют обработку данных по следующим подсистемам: 1) управление технической подготовкой производства; 2) оперативное управление основным производством; 3) технико-экономическое планирование, включая расчеты по ценообразованию; 4) управление материально-техническим снабжением; 5) бухгалтерский учет; 6) управление реализацией и сбытом продукции; 7) управление финансами; 8) управление качеством продукции; 9) управление кадрами; 10) управление транспортным, ремонтным, энергетическим обслуживанием производства.

К классу *интегрированных АСУ (ИАСУ)* промышленными объединениями или отдельными предприятиями относятся многоуровневые АСУ с расширенной взаимосвязью отдельных систем. В состав ИАСУ входят ряд АСУП, АСУТП и другие виды АСУ и САУ, которые связаны по вертикали.

Системы автоматической стабилизации (САС_т)

САС_т обеспечивают поддержание постоянными значения управляемого параметра процесса. Примерами САС_т являются: стабилизация температуры в холодильной камере или в шахте зерносушилки; стабилизация напряжения при питании измерительных приборов и т.д. САУ стабилизации при всех установившихся состояниях должны обеспечивать следующее уравнение $y = c + \Delta(x)$, где y - регулируемый (управляемый) параметр, c - заданное значение регулируемого (управляемого) параметра, $\Delta(x)$ - отклонение управляемого параметра, зависящее от некоторых факторов x_1, x_2, \dots (в общем случае это вектор X) возмущений. Выделяют основное возмущение, ко-

торое вызывает максимальное воздействие на y . Это воздействие чаще всего является нагрузкой ОАУ.

Следящая САУ

Следящая САУ имеет такой алгоритм управления, согласно которому управляемый параметр (процесс) изменяется в зависимости от изменения заранее неизвестного (неуправляемого) параметра (процесса) на входе ОАУ.

Для следящей САУ её функциональное описание, в общем случае, имеет вид: $y = kx$, где $k = const$, $x = var$.

При описании следящей САУ встречаются термины: регулируемый параметр y часто называется ведомым, управляемым или исполнительным параметром, входной задаваемый параметр x - ведущим или командным (управляющим) сигналом. Отклонение выходного параметра y от заданного значения $y_0 = kx_0$, соответствующего значению $x = x_0$, называется *рассогласованием*. Процесс управления (регулирования) в следящих САУ часто называют *слежением*, а окончание процесса - *отработкой*.

Следящая САУ в общем случае контролирует рассогласование значений 2 параметров. Устройство управления вступает в действие как только появляется это рассогласование и стремится свести его к нулю. В следящих САУ реализуются следующие уравнения (законы управления):

- 1) повторение входного параметра $y(t) = x(t)$;
- 2) синхронно-синфазное пропорциональное воспроизведение $y(t) = kx(t)$, где $k = const$, при $k < 0$ - ослабление (деление) x , при $k > 0$ - усиление x ;
- 3) масштабирование скорости входного параметра (синхронное пропорциональное воспроизведение скорости) $y(t) = kdx(t)/dt$;
- 4) функциональное управление - задаются более сложные зависимости между x и y .

Реальные следящие системы не могут работать абсолютно точно из-за имеющейся нечувствительности сравнивающего элемента рассогласования и других элементов САУ. Кроме того, так как входной параметр x - произвольная (переменная) функция, то в общем случае нельзя говорить об установившемся режиме такой САУ (рис. 1.6). Из диаграммы видно, что как в установившемся, так и в переходном режимах имеется некоторое рассогласование.

При этом ошибка рассогласования $\Delta = y - x$ состоит из 3 слагаемых: статической ошибки (в установившемся режиме), собственно ошибки переходного режима и ошибки слежения. Так как $x = var$ (т.е.

переменная величина), то понятие статической (регулирующей, рабочей) характеристики теряет смысл.

Следящие системы, применяемые для повторения модели, например, для обработки изделий на станках по заданным моделям или шаблонам, называются *копирующими САУ*.

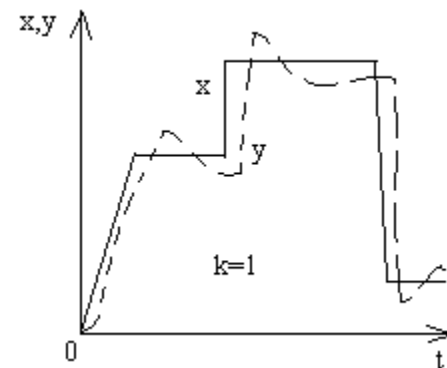


Рис. 1.6. Процессы в следящей САУ

САУ с программным управлением

Это САУ, у которой регулируемый (управляемый) параметр (величина) изменяется по определенному заранее заданному закону (обычно в функции времени). Её работа описывается уравнением

$$y = F(t) + \Delta,$$

где $F(t)$ - какая-либо функция времени, Δ - статическая ошибка плюс нечувствительность управляющего устройства.

Если в САУ стабилизации управляемого (регулируемого) параметра вместо постоянного значения, поступающего с выхода задающего устройства, выдавать текущие значения в соответствии с наперед заданным законом во времени, то получим САУ с программным управлением.

С другой стороны, если в следящей САУ заставить ведущий параметр принимать в каждый момент времени заданные значения и обеспечить в системе пропорциональный закон управления, то изменение управляемого (регулируемого) параметра будет следовать заданной программе. Таким образом, САУ с программным управлением можно считать частными случаями следящих САУ и развитием САУ стабилизации.

САУ с логико-программным (функциональным) управлением

Такие САУ обеспечивают изменение параметров ОАУ в соответствии с заранее обусловленным алгоритмом (функциональной зависимостью). Они являются дальнейшим развитием САУ со следящим и программным управлением. В них перед управляющим устройством ставится задача автоматически поддерживать между выходным параметром ОАУ и входным параметром САУ (задающим) заданную функциональную зависимость: $y = F(f_3)$, где F - какая-либо функция. Эта зависимость может быть задана точно или приближенно некоторой явной или неявной функциями: $y = F(f_3, y, a, b, \dots)$ или $F(f_3, y, a, b, \dots) = 0$, где $a, b, \dots = const$.

Структурная схема такой САУ представлена на рис. 1.7.

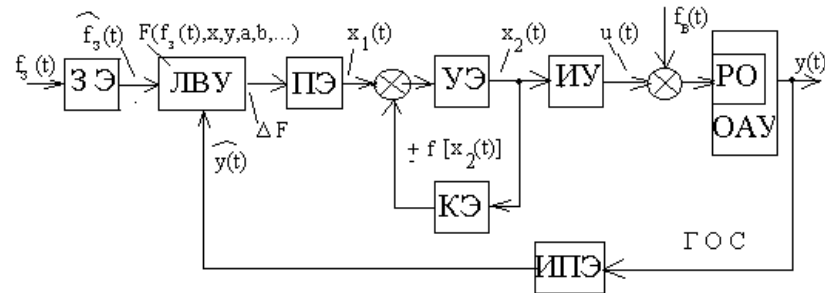


Рис.1.7. Структурная схема САУ с логико - программным управлением: ЗЭ - задающий элемент, ЛВУ – логическое вычислительное устройство, ПЭ - преобразующий элемент, УЭ - усилительный элемент, ИУ - исполнительное устройство, РО - регулирующий орган, ОАУ - объект автоматического управления, ИПЭ - измерительно-преобразовательный элемент, ГОС - главная обратная связь

В качестве сравнивающего устройства используется логико-вычислительное устройство, которое через преобразующие элементы (ПЭ и ИПЭ) воспринимает x и y и производит вычисление значений функции: $F(x, y, a, b, \dots) = \Delta F$, где ΔF - рассогласование (разбаланс) между y и f_3 . Сигнал ΔF преобразовывается в ПЭ, усиливается в усилительном элементе (УЭ), который может быть охвачен с помощью корректирующего элемента КЭ корректирующей обратной связью (КОС), затем сигнал подается на исполнительное устройство (ИУ) для осуществления управляющего воздействия U на ОАУ таким образом, чтобы $\Delta F \rightarrow 0$. Здесь f_3 - возмущения, воздействующие на ОАУ и САУ.

Адаптивные САУ

Адаптивные САУ иногда называют кибернетическими. Их классификация приведена на рис.1.8. Адаптивные САУ являются дальнейшим развитием САУ стабилизации, следящих, программного и программно-логического управления, у которых параметры, схемы соединения составляющих элементов, алгоритмы функционирования остаются неизменными во время работы. В САУ стабилизации задающий элемент выдаёт постоянную величину, которая может изменяться время от времени только самим человеком-оператором.



Рис.1.8. Классификация адаптивных САУ

Самоприспосабливающиеся САУ - в которых при изменении условий работы происходит самоизменение (приспособление) задающих воздействий (уставок), программ, алгоритмов (законов) управления, постоянных параметров или схем соединений элементов. В состав таких систем, как правило, входит логически-вычислительное устройство (включающее аналоговые или цифровые вычислительные машины - АВМ и ЦВМ, или микропроцессорные системы). Алгоритм функционирования таких САУ является гибким, перестраиваемым. Такие САУ кроме элементов, имеющих у обычных САУ, имеют также логические и другие элементы: памяти,

вычислительные и автоматического поиска (в том числе поиска экстремумов).

Самонастраивающиеся и самоприспосабливающиеся САУ, в отличие от обычных, имеют дополнительное устройство, которое корректирует работу задающего элемента и основного управляющего устройства (УУ), изменяя их параметры или схему соединений или алгоритм (программу). Это устройство связано с ОАУ и получает сигналы о возмущениях, регулируемых параметрах, внешних условиях, на основании которых и вырабатывает корректирующее воздействие, передаваемое задающему элементу (ЗЭ) или основному УУ. Таким образом, это устройство является по существу вторым УУ (регулятором), управляющим работой основного УУ (регулятора).

Обобщенная структурная схема самонастраивающейся САУ дана на рис. 1.9, где W_0 - основное возмущение, W_d - дополнительное возмущение, y - сигнал о состоянии объекта.

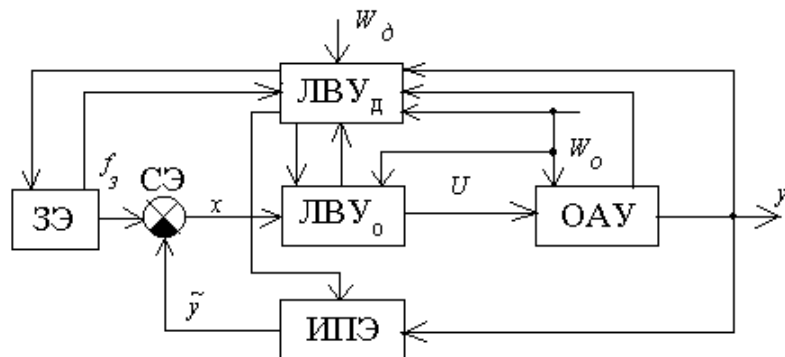


Рис. 1.9. Структурная схема самонастраивающейся САУ

Все самонастраивающиеся САУ делятся на 2 класса:

1) самонастраивающиеся САУ позиционного управления, у которых все условия (параметры), влияющие на установление оптимального режима, могут быть измерены и, кроме того, известны зависимости, связывающие параметры с показателями оптимальности (критерием качества). В этом случае дополнительная автоматизация САУ может быть ограничена специализированным вычислителем, который на основании измерений и данных, полученных по связям, вычисляет критерий качества. Далее, исходя из этого критерия, он вырабатывает дополнительные корректирующие сигналы, воздействующие на элементы основного УУ, задающего элемента и в более слож-

ных случаях на обратные связи (ОС) системы. Примером таких САУ может служить САУ управления загрузкой ДВС МТА для задания оптимального режима по производительности или расходу топлива;

2) самонастраивающиеся САУ с автоматической оптимизацией - имеют устройство автоматического поиска оптимального критерия качества управляемого процесса (оптимизаторы). Они применяются тогда, когда все условия (параметры), влияющие на установление оптимального режима ОАУ или часть их, не могут быть измерены, или неизвестны зависимости показателя оптимальности от этих параметров. Пример таких САУ - автоматическое управление полетом снаряда.

В зависимости от того, какой элемент САУ должен автоматически приспосабливаться, самоприспосабливающиеся САУ могут быть разделены на следующие 5 групп:

1) САУ с самоизменяющейся уставкой ЗЭ - это САУ стабилизации, у которых уставка автоматически изменяется в зависимости от возмущений в соответствии с изменением показателя, управляющего уставкой.

2) САУ с самоизменяющейся программой или алгоритмом управления - это САУ с программным управлением, у которого программа автоматически изменяется в зависимости от изменения возмущений или через определенные отрезки времени, или при изменении внутреннего состояния САУ. Здесь также должен быть установлен показатель управления программой, изменение которого вызывает смену программы (к этой группе относятся также САУ с самоизменением алгоритма).

Пример - САУ программного управления станков с числовым программным управлением (ЧПУ) с самоизменением вида интерполяции. Дело в том, что цифровая программа, задающая уставку, определяет сравнительно небольшое число опорных точек. Промежуточные точки находятся САУ с помощью интерполирующих устройств, которые могут быть различных типов: линейные, квадратичные, степенные и др. Для некоторых изделий необходимо менять тип интерполяции автоматически в процессе работы.

3) САУ с самоизменяющимся законом управления. В обычных следящих САУ управляющий процесс повторяет изменения входного параметра (уставки) в заданном масштабе, то есть наблюдается линейный (пропорциональный) закон управления. Но следящие САУ, а также САУ с функциональным управлением могут осуществлять кроме того нелинейные законы управления (квадратичные, логарифмические и т. д.). САУ с самоизменяющимся законом управления

должна автоматически на основе установленного показателя в процессе работы выбирать вариант закона управления из имеющихся в её памяти.

4) САУ с самоизменяющимися параметрами и характеристиками отдельных элементов, которые могут изменяться дискретно, время от времени или непрерывно в течение всего процесса управления.

Сюда также относятся САУ с самоизменяющимися характеристиками нелинейных элементов, имеющихся в ее составе.

5) САУ с самоизменяющейся структурой. У таких САУ автоматически изменяются схемы соединений, переключаются элементы или вводятся новые элементы. Эти изменения осуществляются каким-либо органом, реагирующим на изменение возмущений или состояния ОАУ (пример - резервирование дизельных электроустановок).

Самообучающиеся САУ (самоулучшающиеся) имеют устройство ЛВУ для упорядочения процесса отбора требуемого режима работы САУ вероятностными методами. Задача ЛВУ состоит в том, чтобы оперативно перебрать ряд значений управляющих воздействий на ОАУ (то есть протестировать его), запомнить получившиеся при этом установившиеся значения управляемого параметра, сравнить их между собой и выбрать то значение, которое лучше удовлетворяет требуемому режиму. Кроме того, САУ имеет устройство, корректирующее характеристики отдельных звеньев в соответствии с полученными вероятностными показателями, а также имеет конечную цель - достижение оптимального режима при существующих условиях.

Задача оптимальных и экстремальных САУ - достичь наилучшим образом цели управления при заданных ограничениях, по заданному критерию оптимизации. Оптимизация достигается по одному или нескольким показателям качества САУ (точности, быстродействию, помехоустойчивости и так далее).

Экстремальные САУ (частный вид оптимальных САУ) - поддерживают один или несколько показателей ТП на экстремальном уровне при непрерывном изменении возмущений.

Пример: Пусть регулируемый параметр является функцией 2 переменных параметров φ_1 и φ_2 технологического процесса: $y = y(\varphi_1, \varphi_2)$, причем y имеет экстремум (рис.1.10). Эта зависимость может быть представлена семейством графиков $y = y(\varphi_1)$ при $\varphi_2 = \text{const}$ (или наоборот).

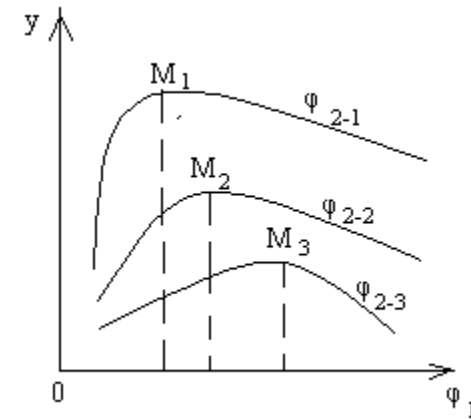


Рис.1.10. Зависимость регулируемого параметра для экстремальной САУ

Уравнение экстремальной САУ: $y \rightarrow \text{extr}$ при $f_3 = \text{var}$, где f_3 - уставка УУ (задающее воздействие). Пример экстремальной САУ - САУ температурой печи (рис.1.11), управление достигается за счёт поворота заслонки, подающей воздух.

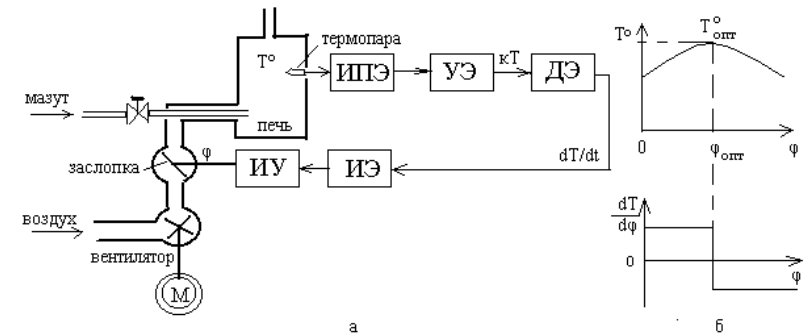


Рис.1.11. Экстремальная САУ температурой печи: ИПЭ - измерительно-преобразовательный элемент, УЭ - усилительный элемент, ДЭ - дифференцирующий элемент, ИЭ - измеритель экстремума, ИУ - исполнительное устройство

САУ с искусственным интеллектом (экспертные системы) - используют опыт, накопленный при разработке и эксплуатации ОАУ.

ЛВУ выполнены как правило, на микроЭВМ или МПС. Основу экспертных систем (ЭС) составляют базы знаний и механизмы работы с ними. ЭС воплощают в ЭВМ опыт человека-эксперта, основанный на знаниях, в такой форме, что машина может дать интеллектуальный совет или принять интеллектуальное решение. ЭС оперируют, в отличие от обычных информационно-измерительных систем (ИИС) не только базой данных (количественными величинами), но и понятийными, концептуальными знаниями, выраженными на естественном языке в терминах предметной области (т.е. совокупностью сведений о количественных и качественных характеристиках объекта управления, а также знаниями относительно стоящих за этими терминами классов состояний и их отношений). Экспертные системы способны строить логические выводы, и на их основе делать обобщения и заключения, вызывать ассоциации. Использование в экспертной системе только знаний из определенной предметной области позволяет отказаться от сложных универсальных методов решения задач, что резко повышает производительность, упрощает структуру построения системы и повышает достоверность идентификации состояния испытуемого объекта.

Особенностью ЭС в САУ является необходимость работы в реальном времени в процессе сбора информации с объекта, а в ряде случаев и оперативное управление ОАУ с целью задания требуемых режимов работы и исключения критических и аварийных ситуаций. Эту задачу решает ИИС, поэтому она должна быть одной из частей ЭС. К особенностям также можно отнести необходимость обеспечения взаимодействия ИИС с той частью ЭС, которая взаимодействует с базой знаний и пакетом идентификации. Кроме того, отсутствует в общем виде четкая логика принятия решения об отнесении состояния ОАУ к тому или иному классу; можно говорить только о каких-то диапазонах существования ряда параметров и областях существования физических процессов, характеризующих работу ОАУ. Следовательно, необходимо дать формализованное описание алгоритмов оценки состояния ОАУ хотя бы в каких-либо узких областях, при анализе только некоторых моделей физических процессов.

Процесс функционирования экспертных измерительных управляющих систем (ЭИУС) определяется целью её создания и ресурсами (ограничениями). Предметной областью ЭИУС являются знания о процессах функционирования и контроля состояния ОАУ. Проблемная область ЭИУС включает предметную область и комплекс задач, решаемых в этой области: определение состава знаний, организация знаний, представление знаний. Для функционирования ЭИУС необходимы следующие знания:

- о физических процессах и информативных признаках, отражающих состояние ОАУ и служащие для создания его модели;
- о способах извлечения информации об объекте (преобразовании и обработке входной информации);
- необходимые для идентификации ОАУ с моделью (оценки степени их близости);
- о процессе решения задачи, используемые интерпретатором для вынесения экспертных заключений;
- о форме представления экспертных заключений;
- структурные и управляющие, поддерживающие функционирование системы.

Важной компонентой ЭИУС является база знаний, в которой аккумулируются следующие знания:

- 1) какие имеются литературные, методические и программные материалы, относящиеся к процессам функционирования ОАУ и определения его технического состояния;
- 2) какова природа обрабатываемых данных и какая модель наиболее подходит как для ОАУ в целом, так и для его составных частей;
- 3) какие методы обработки информации, снимаемой с датчиков, наиболее эффективны, в чём их сущность, каковы особенности и сфера применения;
- 4) какова должна быть технологическая цепочка процедур и алгоритмов, составляющих основную обрабатывающую программу;
- 5) как интерпретировать промежуточные и конечные результаты измерений, как их анализировать, каковы должны быть корректирующие и управляющие команды при анализе предметной области;
- 6) каковы наиболее целесообразные формы представления результатов экспертного анализа.

На всех этапах создания базы данных и организации работы интерпретатора необходимо осуществлять классификацию многомерных информационных потоков (разбиение совокупности состояний объекта или его составных частей на однородные классы состояний). Кроме того, необходим переход от широкого набора признаков сигналов, характеризующих объект, к небольшому числу определяющих (обобщенных) факторов-детерминантов, т.е. необходимо снижение размерности информационных потоков и выбор метрики в пространстве наиболее информативных признаков-детерминантов. Качество дальнейшей классификации в этом пространстве будет существенно зависеть от выбранного метода нахождения расстояния

между классами (метода принятия решения интерпретатором). При выборе указанного метода требуется обосновать пространство действий (операторов), которые можно применить, налагаемые ограничения, а также функцию потерь (риска), необходимую для нахождения оптимального решения задачи. С точки зрения интерпретатора при классификации многомерных информационных потоков, отражающих состояние объекта, вся процедура разработки ЭСД может быть разбита на этапы:

1) постановочный (предметно-содержательное формулирование цели испытания), отбор типа решаемых прикладных задач: выявление наиболее информативных признаков, сжатие исходных данных, визуализация многомерных данных, построение условного координатного пространства, в терминах переменных которого удобно описываются и интерпретируются анализируемые свойства объекта;

2) априорный математико-постановочный (выбор базовой математической модели механизма генерации исходных данных объекта);

3) подготовительно - информационный (составление плана и методик сбора исходной информации, ее предварительная обработка для ввода в ЭВМ);

4) аналитический (применение специальных методов обработки исходных данных для получения частных и обобщенных признаков – детерминаторов: временной, частотной и фазовой селекции; сглаживания, дифференцирования и т.д.);

5) апостериорный математико - постановочный (корректировка при необходимости выбранной базовой модели объекта или его составных частей, с учетом полученных опытных данных);

6) вычислительный (реализация на ЭВМ задач, поставленных на первых двух этапах);

7) итоговый (визуализация результатов испытаний и экспертных заключений, формулирование выводов о дальнейшей судьбе объекта или его составных частей).

При детализации технического обеспечения ЭИУС необходимо определить показатели назначения, обеспечивающие выполнение поставленной цели: номенклатуру измеряемых физических величин (измерительных каналов); номенклатуру и тип датчиков, а также исполнительных органов (при необходимости); информационные показатели исходных данных и интерфейса (объем, быстродействие и др.); структуру интерфейса; метод и структуру селекции сигнала и фильтрации помех; структуру применения специальных методов анализа; методы и средства визуализации результатов.

Для создания технического обеспечения ЭИУС нужна разработка прикладных программ, а также метрологического обеспечения. Типовая экспертная система (рис. 1.12) имеет следующие компоненты:

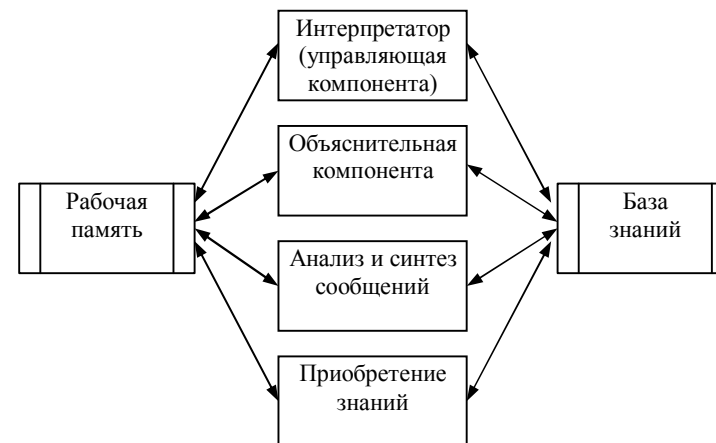


Рис. 1.12. Обобщенная схема типовой экспертной системы

- 1) базу знаний, хранящую множество правил;
- 2) рабочую память, хранящую данные (базу данных);
- 3) интерпретатор, решающий на основе имеющихся в системе знаний предъявленную ему задачу;
- 4) компоненту диалогового взаимодействия с пользователем (экспертом) на естественном для него языке;
- 5) компоненту приобретения знаний;
- 6) объяснительную компоненту, дающую объяснения действий ЭИУС и отвечающей на вопросы о том, по какой причине некоторые заключения были сделаны или отвергнуты.

Экспертная система работает в двух режимах: в режиме приобретения знаний и в режиме решения задач. В режиме приобретения знаний в общении с экспертной системой участвует эксперт (через посредство инженера по знаниям). В этом режиме эксперт наполняет систему знаниями (правилами), которые позволяют ей в режиме решения самостоятельно решать задачи из области экспертизы. В режиме решения задач в общении с системой участвует пользователь (которого интересует результат и (или) способ получения решения) и ОАУ.

В выработке решений участвует база знаний (БЗ) и механизм

логического вывода (МЛВ), а качество определяется тем, насколько хорошо развитой является БЗ. В настоящее время разработчики ЭИУС во многих случаях получают готовые МЛВ, встроенные в те или иные инструментальные оболочки. Задача реализации ЭИУС сводится к приобретению знаний о конкретной прикладной области. Под приобретением знаний для ЭИУС понимается следующее:

- 1) отбор и анализ знаний, касающихся конкретной прикладной области;
- 2) преобразование знаний к формату, позволяющему МЛВ оперировать с этими знаниями;
- 3) поддержка и контроль совместимости (непротиворечивости) и достоверности приобретенных знаний.

Тема 2. Функциональное (математическое) описание САУ

2.1. Основные свойства и характеристики САУ при их функциональном описании

Рассматриваемые здесь положения справедливы как для исследуемых физических объектов, так и для САУ в целом, поэтому далее будем применять единый термин “система”. Классификация систем по функциональному описанию в динамических режимах работы приведена на рис.2.1.



Рис.2.1. Классификация САУ по функциональному описанию

Определения:

-оператор детерминированной системы – правило, по которому каждой реализации входного сигнала ставится в однозначное или взаимно-однозначное соответствие реализация выходного сигнала (рис.2.2): $y=Ax$;

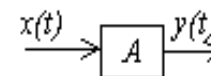


Рис.2.2. Оператор детерминированной системы

-физически возможная система (или элемент системы) – система, преобразующая лишь предшествующие и текущие, но не будущие значения входных сигналов;

-детерминированная система – система, характеризующаяся однозначным или взаимно-однозначным соответствием реализаций

входного и выходного сигналов (реализация – отрезок сигнала во времени или по другому аргументу): $y=A(x)$ или $x=A^{-1}(y)$.

-*вероятностная система* – не характеризуется таким соответствием. (Пример такой системы – движение твердых частиц по поверхности жидкости – броуновское движение);

-*линейная система* – система, подчиняющаяся принципу суперпозиции: $y=A\left\{\sum_{v=1}^k c_v x_v(t)\right\}=\sum_{v=1}^k c_v A\{x_v(t)\}=\sum_{v=1}^k y_v$,

где c_v - постоянные коэффициенты; $x_v(t)$ - процессы на входе системы;

-*нелинейная система* – система, не подчиняющаяся принципу суперпозиции;

-*стационарная система* – система, в которой сдвиг входного сигнала во времени приводит к такому же сдвигу выходного сигнала:

$$A\{x(t-\tau)\}=y(t-\tau);$$

-*нестационарная система*– система, в которой сдвиг входного сигнала во времени не приводит к такому же сдвигу выходного сигнала:

$$A\{x(t-\tau)\}\neq y(t-\tau);$$

-*одномерная система* – система, входной и выходной сигналы которой являются единственными;

-*многомерная система* – система, имеющая множество входных (или) выходных сигналов.

-*инерционная система (элемент)* - значение выходного сигнала этой системы, в некоторый момент времени зависит от значений входного сигнала в тот же момент времени t и от его значений в предшествующие моменты времени;

-*безинерционная система* – система, в которой значение выходного сигнала в любой момент времени зависит только от значения входного сигнала в этот же момент времени;

-*система с сосредоточенными параметрами* – система, оператор которой может быть представлен в виде одного или системы обыкновенных дифференциальных уравнений;

-*система с распределенными параметрами* – система, оператор которой может быть представлен в виде одного или системы дифференциальных уравнений в частных производных.

Линейные системы делятся на 2 класса:

-*линейная система с постоянными параметрами* – система, оператор которой может быть представлен в виде одного или системы дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами (в том числе в частных производных):

$$a_0 y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_{n-2} y^{(1)} + a_{n-1} y + a_n = x(t); a_i = const; \quad (2.1)$$

-*линейная система с переменными параметрами (параметрическая)* – система, оператор которой может быть представлен в виде одного или системы дифференциальных уравнений, в которых по крайней мере один из коэффициентов является функцией времени (но не зависит от выходного сигнала), т.е. представляет собой линейное уравнение (систему) с переменным коэффициентом (или коэффициентами), например:

$$a_0 y^{(n)} + a_1(t) y^{(n-1)} + \dots + a_{n-2} y^{(1)} + a_{n-1} y + a_n = x(t). \quad (2.2)$$

-*Нелинейная система* – система, оператор которой описывается одним или системой дифференциальных уравнений, один или несколько коэффициентов которого являются функциями выходного сигнала y , т.е. представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение, например:

$$a_0 y^{(n)} + a_1(y) y^{(n-1)} + \dots + a_{n-2} y^{(1)} + a_{n-1} y + a_n = x(t); \quad (2.3)$$

Уравнения, описывающие последние 3 вида систем, записывают сокращённо в виде:

$$D(p^*)y = U(p^*)x, \quad (2.4)$$

где $D(p^*)$ и $U(p^*)$ - многочлены от p^* ; p^* – оператор d/dt (при этом многочлен $U(p^*)$ может быть всегда перенесён в левую сторону).

Для САУ с распределёнными параметрами уравнения (2.1) - (2.4) записываются в частных производных.

Свойства линейных систем с постоянными параметрами:

- 1) статические характеристики элементов – линейные;
- 2) справедлив принцип суперпозиции (наложения): при действии на линейную систему нескольких внешних сил, реакцию системы можно определить путем наложения (суперпозиции) решений, найденных для каждой из сил в отдельности (этот принцип лежит в основе частотного или, по-другому, спектрального, основанного на преобразовании Фурье, и операторного (основанного на преобразовании Лапласа) методов анализа переходных процессов в линейных системах;
- 3) при любом сколь угодно сложном воздействии в реакции (отклике) этой системы не возникает новых частот.

В *линейных системах с переменными параметрами* принцип суперпозиции остаётся в силе, т.е. если разложить $x(t)$ на гармоники, то решение (2.2) представляется в виде суммы независимых частных решений, соответствующих каждой из составляющих правой части. Однако эти частные решения будут не гармоническими, а более сложными функциями. Иными словами, даже простейшее гармоническое воздействие создаёт в такой системе сложное колебание,

имеющее спектр частот. Решение дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами удаётся получить в конечном виде только в некоторых частных случаях, что усложняет анализ систем с переменными параметрами.

В нелинейных системах принцип суперпозиции неприменим: при анализе воздействия сложного сигнала на нелинейную систему этот сигнал нельзя разлагать на более простые, необходимо искать отклик системы на результирующий сигнал. Другим свойством этих систем является преобразование спектра сигнала. В нелинейной системе, в отличие от линейной параметрической, структура спектра на выходе зависит не только от формы входного сигнала, но и от его амплитуды. В нелинейных системах могут возникать свободные колебания (автоколебания) без внешнего периодического воздействия. Расход энергии при этом компенсируется внешним источником энергии. Операции в САУ (измерительные преобразования) – генерация, модуляция, детектирование и преобразование частоты – сопровождаются изменением (трансформацией) спектра. Поэтому их осуществление возможно с помощью нелинейных или линейных параметрических систем.

2.2. Характеристики систем и их элементов (в том числе ОАУ) в переходном (динамическом) режиме

Переходная характеристика системы представляет собой выходной сигнал системы при входном тестовом сигнале, имеющем вид единичной функции (для стационарных систем):

$$h(t)=y(t) \text{ при } x(t)=1(t),$$

$$\text{где } 1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0, \\ 1 & \text{при } t \geq 0. \end{cases}$$

Импульсная характеристика системы представляет собой выходной сигнал системы при тестовом входном сигнале, имеющем вид дельта-функции:

$$g(t) = y(t) \text{ при } x(t) = \delta(t),$$

$$\text{где } \delta(t) = \begin{cases} \infty & \text{при } t = 0; \\ 0 & \text{при } t \neq 0, \end{cases}$$

причём $\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1$ (для стационарных систем).

Для физически возможных систем $g(t) \equiv 0$ при $t < 0$.

Для устойчивых систем: $\int_{-\infty}^{\infty} |g(t)| dt < \infty$.

Связь импульсной и переходной характеристик друг с другом имеет вид:

$$h(t) = \int_0^t g(t') dt',$$

$$g(t) = \frac{dh(t)}{dt}.$$

Передаточная функция (ПФ) системы представляет собой преобразование Лапласа импульсной характеристики системы (для стационарных систем):

$$W(p) = \int_0^{\infty} g(t) e^{-pt} dt,$$

причём $W(p) = Y(p)/X(p)$ при нулевых начальных условиях.

Здесь прямое преобразование Лапласа:

$$X(p) = L\{x(t)\} = \int_0^{\infty} x(t) e^{-pt} dt;$$

обратное преобразование Лапласа:

$$x(t) = \frac{1}{j2\pi} \int_{-j\omega}^{j\omega} X(p) e^{pt} dp,$$

где $p = j\omega + \alpha$ – оператор преобразования Лапласа (комплексная переменная); $x(t)$ – оригинал функции $X(p)$; $X(p)$ – изображение функции $x(t)$. Аналогично – для $Y(p)$.

Комплексная частотная характеристика (КЧХ) системы представляет собой преобразование Фурье импульсной характеристики системы:

$$K(j\omega) = \int_0^{\infty} g(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau = |K(j\omega)| e^{-j\arg K(j\omega)} = |K(j\omega)| e^{-j\varphi(\omega)}.$$

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) системы – представляет собой модуль комплексной частотной характеристики:

$$|K(j\omega)| = \{ [Re(K(j\omega))]^2 + [Im(K(j\omega))]^2 \}^{1/2},$$

где $Re(K(j\omega))$ и $Im(K(j\omega))$ – действительная и мнимая части $K(j\omega)$.

Фазо-частотная характеристики (ФЧХ) системы:

$$\varphi(\omega) = \arg K(j\omega) = \arctg [Im(K(j\omega))/Re(K(j\omega))].$$

Применяют также *логарифмические АЧХ и ФЧХ:*

$$L(\omega) = 20 \lg |K(j\omega)|; \quad \varphi(\omega) = 20 \lg |\varphi(j\omega)|.$$

Амплитудная характеристика (АХ) системы – характеристика безинерционной системы, представляющая собой зависимость между мгновенными значениями входного и выходного сигналов:

$$y(t^*) = f[x(t^*)],$$

где $t^* \in T$ – любой фиксированный момент времени, T – область определения процессов $x(t)$ и $y(t)$. Амплитудная характеристика (АХ) в установленном режиме работы системы называется его статической характеристикой.

Для линейных систем с переменными параметрами, у которых один или несколько параметров являются функциями времени, ПФ, КЧХ, АЧХ, ФЧХ и АХ системы зависят не только от частоты, но и от времени. Импульсная и переходная характеристики также будут функциями двух переменных: интервала $\tau = t - t^*$ между моментом t^* приложения δ -функции, или ступеньки $I(t)$ и моментом наблюдения выходного сигнала t , и, кроме того, от положения интервала τ на оси времени, т.е. от t : $g(t, \tau)$, $h(t, \tau)$ или $g(t, t^*)$, $h(t, t^*)$. Тогда КЧХ линейной параметрической системы, запишется в виде:

$$K(j\omega, t) = \int_0^{\infty} g(t, \tau) e^{-j\omega\tau} d\tau.$$

2.3. Уравнение динамики САУ

Динамика САУ – движение САУ под действием управляющих и возмущающих воздействий.

Задача САУ – минимизировать ошибку управления $\Delta y = f_3 - y \rightarrow \min$, где f_3 и y – заданное (предписанное) и текущие значения управляемого параметра (процесса). Изменение y вызывается появлением возмущающих воздействий w , приложенных к САУ (ОАУ и УУ), которые нарушают соответствие $y = f_3$. С другой стороны управляющее воздействие УУ на ОАУ изменяет управляемый параметр таким образом, чтобы было соблюдено условие $y \approx f_3$.

Динамика САУ определяется указанными воздействиями обоих видов. Это движение в общем случае может быть описано дифференциальным уравнением вида:

$$F_1(y, y', y'', \dots) = F_2(w, w', \dots; u, u', \dots), \quad (2.5)$$

где u – управляющее воздействие УУ на ОАУ.

В некоторых случаях это уравнение может быть интегрированным дифференциальным.

Для линейных САУ уравнение (2.5) можно записать в виде

$$F_1(y, y', \dots) = F_{21}(u, u', \dots) + F_{22}(w, w', \dots)$$

или

$$F_1(p^*)y = F_{21}(p^*)u + F_{22}(p^*)w, \quad (2.6)$$

где $p^* = d/dt$ – оператор дифференцирования.

Уравнение (2.6) можно упростить, если ввести приведённое возмущающее воздействие w_p , являющееся одним из решений следующего уравнения: $F_{21}(p^*)w_p = F_{22}(p^*)w$.

Тогда (2.6) запишется в виде

$$F_1(p^*)y = F_{21}(p^*)(u + w_p) \quad (2.7)$$

Управляющее воздействие u приложено к ОАУ, как правило, через регулирующий орган, тогда как возмущающее воздействие w может быть приложено к любому элементу (звену) САУ и, чаще всего, к ОАУ. Из (2.7) следует, что (2.6) не изменится, если воздействие w , приложенное к некоторому звену САУ, заменить приведённым воздействием w_p , приложенным к РО. Это позволяет ограничиться рассмотрением уравнения (2.7) и считать u возмущением в общем смысле.

Введя $\lambda = y/y_0$; $\varphi = (u + w_p)/u_0$, получим уравнение (2.7) в безразмерном виде

$$D(p^*)\lambda = U(p^*)\varphi, \quad (2.8)$$

где y_0 , u_0 – некоторые базисные значения y и u ; $D(p^*)$ и $U(p^*)$ – операторные полиномы.

В зависимости от вида u и w , движение САУ может иметь разный характер. Различают 3 основных случая (рис.2.3).

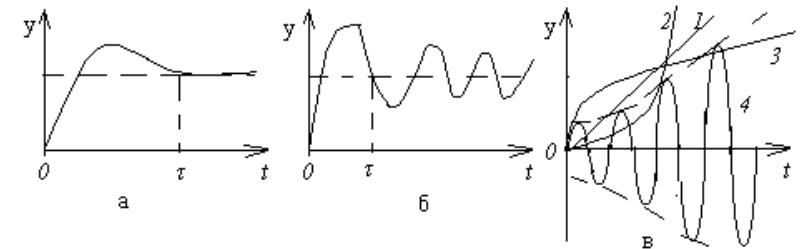


Рис.2.3. Виды переходных процессов систем (элементов)

1. Движение САУ (элемента) прекращается через некоторый промежуток времени (теоретически – бесконечно большой) от момента приложения w , и САУ приходит в состояние покоя (рис.2.3,а).

2. Движение САУ (элемента) по истечении некоторого промежутка времени приобретает установившийся характер, в частности, переходит в установившееся колебательное движение (рис.2.3,б).

3. Движение САУ (элемента) не прекращается и не имеет установившегося состояния (рис.2.3,в).

Всякую САУ можно разложить на простейшие звенья (элементы), движения которых описывается дифференциальными уравнениями не выше второго порядка. Линейная САУ может состоять только из линейных звеньев.

Физические величины, от которых зависят коэффициенты дифференциальных уравнений движения звена или системы, называются *параметрами*. Для описания динамики всей САУ необходимо в соответствии с принципом декомпозиции составить уравнения её отдельных звеньев. Звено может быть одномерным и многомерным, т.е. имеющем связи на входе или выходе с рядом других звеньев. Выходной параметр (процесс, сигнал) такого звена будет функцией нескольких обобщённых координат системы, по аналогии с механикой, где под обобщёнными координатами понимают те независимые переменные, значения которых вполне определяют состояние системы в каждый момент времени.

Полученное уравнение динамики звена будет справедливо также при $t \rightarrow \infty$, т.е. в установившемся режиме.

Обычно в САУ применяются элементы (звенья), имеющие направленность действия (вентильный или детекторный тип), т.е. они допускают прохождение воздействия только в одном направлении: от входа к выходу. В таких звеньях выходной сигнал (параметр) не оказывает обратного воздействия на вход своего звена или предыдущих звеньев. Примеры: термopара, центробежный регулятор скорости, поршневой масляный сервомотор с золотником и др. Изменение напряжения на термopаре не может изменить окружающую температуру, простое перемещение муфты извне не может изменить скорость, перемещение извне поршня не воспроизведёт перемещение золотника и т.д. Примером звена второго типа (имеющего оба направления воздействия) является шунтовой электродвигатель постоянного тока с независимым возбуждением, используемый для регулировки скорости. При изменении напряжения на зажимах электродвигателя, изменяется его частота вращения n . При вращении вала электродвигателя от другого источника, он превращается в генератор. Обратное воздействие при регулировке частоты n электродвигателя выражается в индуктировании противоЭДС в якоре, которая направлена против входного напряжения.

Составление уравнений звеньев направленного действия может выполняться отдельно и независимо от других звеньев САУ. Для звеньев ненаправленного действия необходимо учитывать реакцию

звена. Всякое звено ненаправленного действия может быть заменено соответствующим набором направленных звеньев. Поэтому в дальнейшем будем полагать, что все звенья САУ являются звеньями направленного действия.

Линеаризация уравнений динамики

Если при составлении уравнений звеньев (в том числе ОАУ) принимаются во внимание все факторы, влияющие на динамику процесса управления, то уравнения получаются сложными, чаще всего нелинейными и трудно поддающимися решению (интегрированию). Поэтому уравнения таких нелинейных звеньев заменяются приближенными линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. Такая операция называется *линеаризацией*.

Следует заметить, что линеаризация не всегда законна при описании звеньев САУ с точки зрения устойчивости САУ. Дело в том, что линейные САУ, динамика которых описывается линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами, будучи устойчивы при малых отклонениях от положения равновесия (установившегося), оказываются устойчивыми и при больших, т.е. при значительных конечных значениях отклонений. Реальные же нелинейные САУ, описываемые нелинейным дифференциальным уравнением, в этом отношении существенно отличаются от линейных. Они могут быть неограниченно устойчивы, устойчивы в большом, устойчивы в малом или совсем неустойчивы.

Наиболее распространенный метод линеаризации – *метод малых отклонений*, в основу которого положена формула разложения аналитической непрерывной функции в ряд Тейлора и принимается допущение, что движение звена происходит в пределах малых отклонений от некоторой точки, которая характеризует состояние звена в избранный момент времени, т.е. движение происходит в окрестности этой точки. Если САУ имеет положение равновесия или покоя, то движение рассматривается в окрестности одного из этих положений. Отбрасывание в ряде Тейлора малостей 2-го порядка и высших порядков приводит к искомому результату.

Рассмотрим случай линеаризации звена, когда зависимость между выходной и входной величинами описывается некоторым дифференциальным уравнением, например, 2-го порядка:

$$F(y, y', y'', x, x') = 0, \quad (2.9)$$

где x, y – входной и выходной сигналы.

В другом виде это уравнение записывается так:

$$a_2 y'' + a_1 y' + a_0 y = b_1 x' + b_0 x. \quad (2.10)$$

Рассмотрим движение в окрестности точки $y = y_0, x = x_0$ и соответственно $y' = y'_0, y'' = y''_0$ и $x' = x'_0$, тогда в этой точке.

$$F(y_0, y'_0, y''_0, x_0, x'_0) = 0 \quad (2.11)$$

При малых отклонениях от этой точки $y = y_0 + \Delta y, x = x_0 + \Delta x, y' = y'_0 + \Delta y', y'' = y''_0 + \Delta y'', x' = x'_0 + \Delta x'$. Подставляя эти значения в (2.11) и разлагая неявную функцию в ряд Тейлора, получим следующее уравнение:

$$F(y_0, y'_0, y''_0, x_0, x'_0) + \Delta x [\partial F / \partial x]_0 + \Delta x' [\partial F / \partial x']_0 + \Delta y [\partial F / \partial y]_0 + \Delta y' [\partial F / \partial y']_0 + 1/2 (\Delta x)^2 [\partial^2 F / \partial x^2]_0 + \Delta y'' [\partial F / \partial y'']_0 + 1/2 (\Delta y)^2 [\partial^2 F / \partial y^2]_0 + \dots = 0.$$

Очевидно, что $\Delta y' = (\Delta y)''$, $\Delta y'' = (\Delta y)'''$. Тогда, с учетом (2.11) и отбрасывания членов с малостями второго и выше порядков, получим уравнение малых отклонений в линеаризованном виде:

$$\Delta x [\partial F / \partial x]_0 + (\Delta x)' [\partial F / \partial x']_0 + \Delta y [\partial F / \partial y]_0 + (\Delta y)' [\partial F / \partial y']_0 + (\Delta y)'' [\partial F / \partial y'']_0 = 0. \quad (2.12)$$

Рассмотренный метод ещё называют “методом замораживания коэффициентов”.

Из приведённого примера видно, что этот метод применим к уравнениям звена произвольного вида, если только функция F представляет собой непрерывную аналитическую функцию в зоне управления (т.е. не имеет разрывов). В уравнении (2.12) размерность членов может быть различной в зависимости от рода физических или других величин, входящих в уравнение. Кроме того, форма его ненаглядна и трудно анализируется. Поэтому часто применяют безразмерную форму уравнения (2.12), когда вместо абсолютных отклонений подставляются их относительные отклонения, аналогично уравнению (2.8).

Составление системы уравнений САУ

После того, как все уравнения звеньев найдены и линеаризованы, необходимо построить систему уравнений, описывающих динамику САУ в целом. Для этого вводятся условия (уравнения) связей, существующих между звеньями (обобщенными коэффициентами). Соединение звеньев может быть непосредственное, когда выходной параметр (процесс) одного звена приравнивается к входному параметру следующего, либо с помощью различных передаточных устройств: рычагов, редукторов, трансформаторов и т.п. В этом случае необходимо учитывать уравнения этих передаточных устройств, чаще всего они выражаются уравнением:

$$y_{вых} = a y_{вх},$$

где $y_{вх}$, $y_{вых}$ - входной и выходной параметры передаточного звена; $a = const$. В безразмерной форме это уравнение имеет вид:

$$\lambda_2 y_{вых} = a \lambda_1 y_{вх},$$

где $\lambda_1 = y_{вх} / y_{вх \delta}$, $\lambda_2 = y_{вых} / y_{вых \delta}$.

Единого правила составления системы уравнений САУ (которая может быть сведена в одно уравнение) нет. Оно зависит от конкретной системы. Однако, есть уравнения типичных звеньев.

Методы решения уравнений динамики линейных САУ

Непосредственное решение дифференциальных уравнений (классический метод) в теории автоматического управления, как правило, не используется. Ещё реже используется *метод проходной проводимости* и *-функции*. Когда интересуются частотным представлением процессов в САУ, то используют *преобразование Фурье*. Однако его можно получить также через преобразование Лапласа. Основным математическим аппаратом исследования динамики САУ является *операционное исчисление (преобразование Лапласа)*.

Применение преобразования Лапласа позволяет значительно упростить нахождение решений дифференциальных уравнений, так как операции дифференцирования, интегрирования заменяются более простыми алгебраическими операциями умножения и деления.

Преобразование Лапласа (прямое):

$$X(p) = L\{x(t)\} = \int_0^{\infty} e^{-pt} x(t) dt, \quad (2.13)$$

где $x(t)$ - оригинал; $X(p)$ - изображение; p - комплексная переменная (иногда вместо p применяют обозначение s): $p = \sigma + j\omega$.

Обратное преобразование Лапласа:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} F(p) e^{pt} dp = L^{-1}\{F(p)\}, \quad (2.14)$$

где $c = const$ -

Пример. Уравнение линейного звена 1-го порядка:

$$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t)$$

запишется в виде

$$(Tp + 1)Y(p) = kX(p) + Ty(0)$$

или

$$Y(p) = \frac{k}{Tp + 1} [X(p) + \frac{T}{k} y(0)],$$

где $y(0)$ - начальные условия (н.у.).

Обозначив $K(p)=k/(Tp+I)$ и $X_{ny}(0)=(T/k)y(0)$, запишем

$$Y(p)=K(p)[X(p)+X_{ny}(p)].$$

$$\text{При } y(0)=0 \quad Y(p)=K(p)X(p).$$

Следовательно, формально передаточная функция выводится из дифференциального уравнения после замены в нём символа кратного дифференцирования на соответствующую степень p и деления образованного таким образом многочлена правой части уравнения на многочлен левой части уравнения, т.е. в исходном дифференциальном уравнении заменяются: $x(t)$ - на $X(p)$, $y(t)$ - на $Y(p)$, d/dt - на p , d^n/dt^n на p^n (постоянные величины остаются неизменными).-

Для общего уравнения (2.8), полагая, что при $t<0$ (т.е. $t=-0$) начальные условия функции $\varphi(t)$ равны нулю, получим:

$$D(p)\Lambda(p)=U(p)\Phi(p),$$

где $p=\sigma+j\omega$ - оператор преобразования Лапласа. Отсюда изображение управляемого параметра

$$\Lambda(p)=U(p)\Phi(p)/D(p)=K(p)\Phi(p).$$

Для нахождения $\lambda(t)$ применяется обратное преобразование Лапласа (с помощью таблиц преобразования), при этом функция $\Lambda(p)$ разбивается на более простые составляющие.

При ненулевых начальных условиях

$$\Lambda(p)=U(p)\Phi(p)/D(p) + Q_n(p)/D(p) = A_0(p) + A_{cn}(p),$$

где $A_0(p)$ - изображение по Лапласу установившегося движения λ_{co} и составляющей переходного процесса λ_e , зависящей от возмущающих сил: $A_0(p) = A_{co}(p) + A_e(p)$ - движение САУ при заданном внешнем возмущающем воздействии $\varphi(t)$ и нулевых начальных условиях (н.у.); $A_{cn}(p)$ - изображение λ_{cn} , это движение САУ при отсутствии возмущающего воздействия, но при наличии заданных начальных условий. Начальные условия устанавливаются для каждого звена САУ по отдельности и могут затем преобразованы в начальные условия для всей САУ.

Таким образом, движение САУ можно разделить на 2 этапа:

- 1) движение при заданном воздействии и нулевых н.у.;
- 2) движение при отсутствии воздействий и наличии заданных (ненулевых) н.у.

Рассмотрим пример для наиболее характерного возмущающего воздействия (включение и сброс нагрузки) $\varphi(t)=I(t)$, для которого $L\{I^{(m)}(t)\}=p^{m-1}$, т.е. $L\{I(t)\}=1/p$, $L\{dI(t)/dt\}=1$ и т.д.

Переходный процесс при нулевых н.у. в общем случае, когда

$$D(p^*)=a_n p^{*n} + a_{n-1} p^{*(n-1)} + \dots + a_0,$$

$$U(p^*)=b_m p^{*m} + b_{m-1} p^{*(m-1)} + \dots + b_0, \quad m < n,$$

имеет вид (здесь обозначено $p^*=d/dt$):

$$L\{D(p^*)\lambda(t)\}=L\{U(p^*)I(t)\}$$

или

$$L\{D(p^*)\lambda(t)\}=L\{U(p^*)I(t)\},$$

или

$$(a_n p^{*n} + a_{n-1} p^{*(n-1)} + \dots + a_0) \Lambda(p) = [b_m p^{*m} + b_{m-1} p^{*(m-2)} + \dots + b_1 p^{*0} + b_0] / p,$$

или $D(p) \Lambda(p) = U(p) / p$.

Откуда имеем

$$\Lambda(p) = \frac{U(p)}{pD(p)} = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_0}{p(a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0)} = \frac{K(p)}{p}.$$

Это дробно-рациональная функция ($m < n$), которая может быть разложена на простейшие дроби и с помощью обратного преобразования Лапласа получена для оригинала $\lambda(t)$.

Различают ПФ звена, а также ПФ разомкнутой и замкнутой САУ, ПФ по задающему и управляющему воздействиям. В последнем случае это отношение изображения управляемого параметра к изображению задающего (или возмущающего) воздействия, вызвавшего это изменение:

$$K_z(p) = Y(p)/F_z(p); \quad K_e(p) = Y(p)/F_e(p).$$

2.4. Морфологическое (структурное) описание САУ

Морфологическое (структурное) описание САУ характеризуется пятеркой: $S_M = (\{\vec{\Sigma}, \vec{V}, \sigma, K_C\}; \{\vec{O}_M\})$, где $\vec{\Sigma} = \{\Sigma_i\} = \Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_n$ - множество составных элементов САУ и их свойств; $\vec{V} = \{V_i\} = V_1, V_2, \dots, V_p$ - множество связей между элементами САУ; σ - структура; K_C - композиция; $\{\vec{O}_M\} = O_{M1}, O_{M2}, \dots, O_{Mr}$ - множество ограничений, накладываемых на σ и K_C .

Состав элементов может быть однородным, смешанным, свойства их - информационные, информационно-энергетические, вещественные. Связи \vec{V} могут быть информационными, энергетическими, вещественными, прямыми и обратными. Структура σ может быть детерминированной или вероятностной, построения иерархические или смешанные. Композиция САУ K_C может быть с рецепторными подсистемами (элементами), преобразующими задающие и

возмущающие воздействия в информационные сигналы, с помощью которых обрабатывается и переносится информация, или с эффекторными подсистемами (элементами), преобразующими воздействие в энергию и воздействующих с её помощью на другие системы (элементы) или на ОАУ (например, исполнительные механизмы).

Морфологическое описание САУ, учитывающее пятерку S_M , характеризуется схемами автоматизации. Структурные, функциональные, монтажные, принципиальные, алгоритмические схемы выполняются по ЕСКД и изучаются в других дисциплинах. В теории САУ, кроме того, применяются обобщённая структурная схема (рис.2.4) и структурно-функциональные (структурно-алгоритмические) схемы.

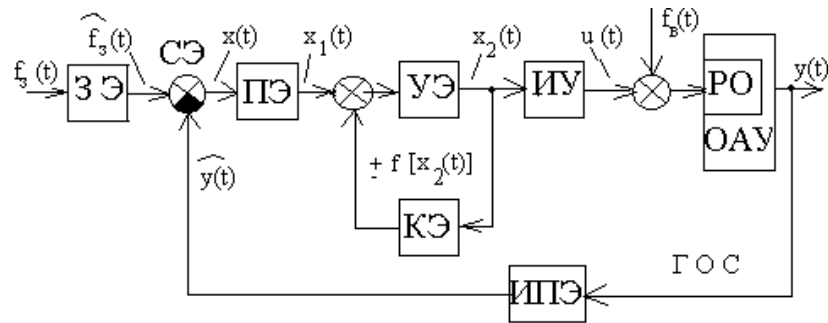


Рис.2.4.. Обобщённая структурная схема САУ

Обобщённая структурная функциональная схема САУ (рис.2.4) содержит следующие элементы. ЗЭ – задающий элемент, он формирует задающее (эталонное) воздействие $f_s(t)$, выработанное из $f_s(t)$ и которое преобразуется в однозначно соответствующее (нормативное, приведенное к одной физической величине и так далее) воздействие $f_s^*(t)$, удобное для сравнения с $y(t)$. Сравнивающий элемент (СЭ) – в общем случае определяет рассогласование сигналов: задающего и управляющего (ошибку управления): $x(t) = f_s^*(t) - y(t)$; ИПЭ – измерительно-преобразовательный элемент – измеряет фактическое (действительное) значение управляемого параметра (процесса) $y(t)$ разной физической природы и преобразует его в однозначно соответствующий сигнал $y^*(t)$, удобный для сравнения с $f_s^*(t)$. В общем случае он состоит из первичного измерительного преобразователя (чувствительного элемента) – датчика и измерительных преобразователей различного рода. ПЭ – преобразующий элемент - преобразует сигнал $x(t)$ в удобный для дальнейшей обработки сигнал в соответствии с тре-

буемым алгоритмом управления. УЭ – усилительный элемент осуществляет масштабирование (чаще всего усиление) сигнала рассогласования до значения достаточного для работы ИУ. ИУ – исполнительное устройство вырабатывает и подает на регулирующий орган (РО) ОАУ управляющее воздействие $u(t)$. КЭ – корректирующий элемент (т.е. корректирующая, местная, внутренняя, локальная обратная связь - КОС, МОС, ВОС, ЛОС; эти термины идентичны) - улучшает, корректирует качество процесса управления, чаще всего реализуется с помощью местной (внутренней), обратной связи (ОС), положительной или отрицательной. Корректирующая ОС может охватывать не только УЭ, но также ПЭ и ИУ. Кроме того, может быть несколько параллельных и последовательных КОС. ГОС – главная обратная связь осуществляет связь между входом и выходом САУ, образуя замкнутый контур управления (она может включать в общем случае ИПЭ); ⊗- сумматор (зачернённый сектор указывает на суммирование с противоположным знаком, т.е. вычитание).

В реальных САУ функции отдельных элементов: СЭ, ИПЭ, ПЭ, ЗЭ могут конструктивно совмещаться, а некоторые элементы могут отсутствовать.

На ОАУ (и на другие элементы САУ) кроме управляющего воздействия оказывает влияние и возмущающее воздействие $f_a(t)$ – изменение нагрузки на ОАУ, температуры окружающей среды и так далее.

Воздействия, нарушающие работу элементов САУ, называют мешающими или помехами.

Возмущающие воздействия приводят к изменению управляемого (выходного) параметра (процесса) $y(t)$ ОАУ.

Изменение во времени процессов (параметров) $u(t)$, $f_a(t)$ и $y(t)$ характеризуют состояние ОАУ. Для борьбы с влиянием возмущений на ОАУ и реализации алгоритма управления САУ снабжается РО, на который непосредственно воздействует ИУ.

Структурные функциональные (структурные алгоритмические) схемы отображают выполнение каждым элементом САУ определённой функции. Под функциями понимают получение и преобразование информации, передачу и сравнение сигналов, формирование управляющих воздействий. Функция, выполняемая каждым элементом, записывается в прямоугольнике в виде передаточной функции, с входной и выходной стрелками. Эти схемы, как правило, строятся после составления обобщённой структурной схемы данной САУ.

Наряду со структурными функциональными (структурными алгоритмическими) используют граф-диаграмму прохождения сиг-

налов. Ветви графа соответствуют передаточным функциям элементов, а узлы графа – соединениям-связям элементов.

Соединение элементов в САУ

Отдельные элементы (звенья) САУ могут соединяться между собой в трёх основных комбинациях: последовательно, параллельно согласованно, параллельно встречно (рис. 2.5,а-в), то есть с обратной связью, а также комбинированно - соединением указанных трёх видов схем.

При *последовательном соединении звеньев*. (рис. 2.5,а, г-д).

$$X_n(p) = K_p(p) X_1(p),$$

где $K_p(p) = K_1(p) \cdot K_2(p) \cdot \dots \cdot K_n(p) = \prod_{i=1}^{n-1} K_i(p)$.

При *параллельном (согласованном) соединении звеньев* (рис. 2.5,е-ж)

$$X_{вых}(p) = K_p(p) X_{вв}(p) = [K_1(p) + K_2(p) + \dots + K_n(p)] X_{вв}(p) = X_{вв}(p) \sum_{i=1}^n K_i(p).$$

При *соединении звеньев с обратной связью (параллельном встречном)*

$$X_2(p) = K_1(p) X_0(p) / [1 \pm K_1(p) K_2(p)] = K_{oc}(p) X_0(p),$$

где $K_{oc}(p) = K_1(p) / [1 \pm K_1(p) K_2(p)]$.

Здесь плюс – для ООС, минус – для ПОС; $K_1(p)$ – ПФ прямой ветви; $K_2(p)$ – ПФ обратной ветви.

Используя принцип декомпозиции, любую систему можно разбить на элементы (звенья), подсистемы, соединённые между собой одним из указанных способов, а используя принцип композиции, можно соединяя отдельные элементы (звенья, подсистемы) одним из указанных способов, получить САУ с требуемым законом управления.

Для упрощения структурных схем, получения ПФ всей разомкнутой системы, замкнутой САУ по ошибке и управляющему сигналу применяют *структурные преобразования*. Необходимо помнить, что они основаны на принципе суперпозиции, поэтому применимы только для линейных САУ. Однако разработаны некоторые способы структурных преобразований, пригодные и для нелинейных САУ. Некоторые правила преобразования структурных схем (кроме рассмотренных) представлены на рис 2.5, и-н.

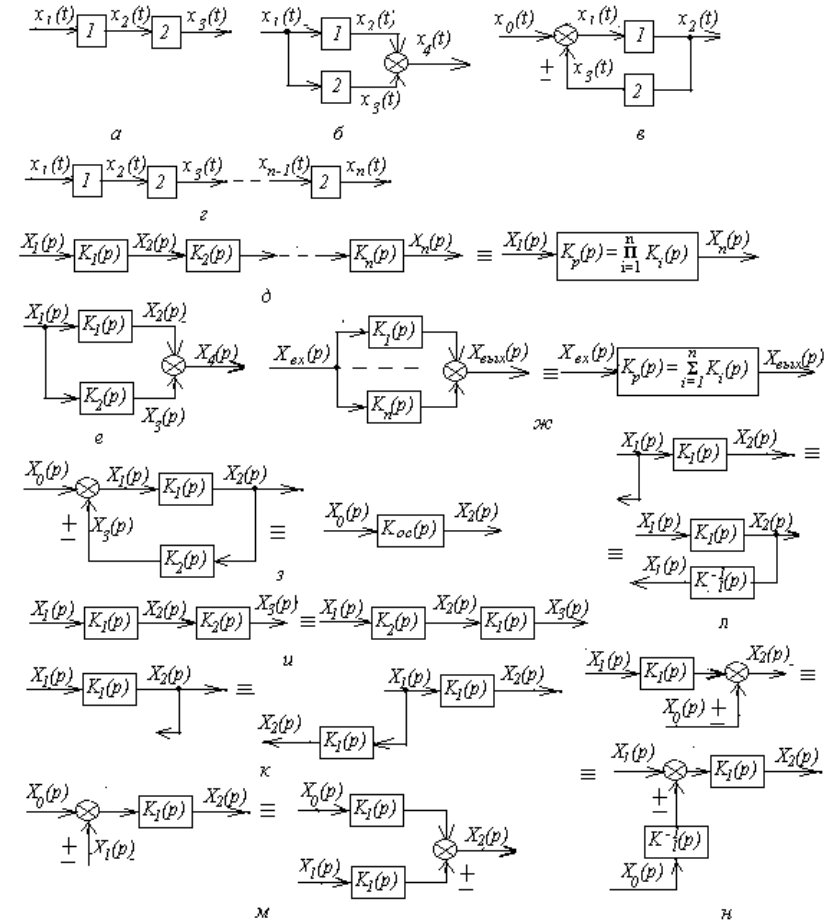


Рис.2.5. Виды соединений элементов и структурных преобразований в САУ

Структура САУ

Замкнутая САУ с жёсткой ОС по управляющему воздействию (рис.2.6,а).

$$X_n(p) = K_p(p) X_1(p) / [1 + K_p(p)] = K_3(p) X_1(p),$$

где $K_3(p) = K_p(p) / [1 + K_p(p)]$.

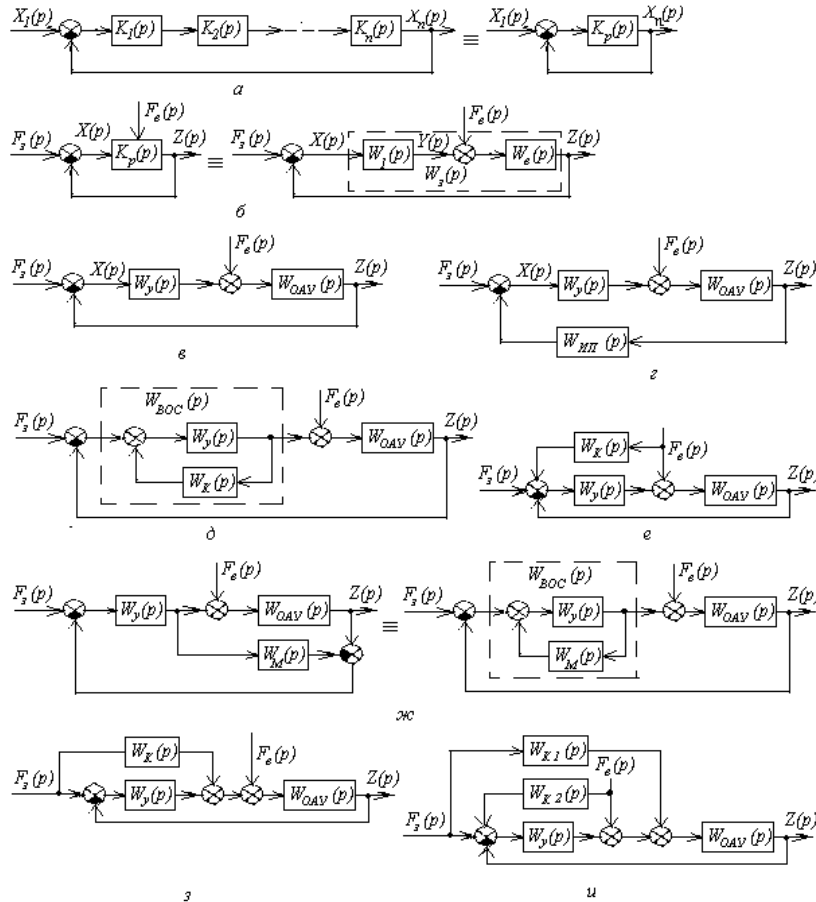


Рис.2.6. Виды структур САУ

ПФ относительно задающего и возмущающего воздействий

Заменяв общую структурную схему замкнутой САУ или отдельных звеньев УУ (рис.2.6,а) на схему (рис.2.6,б), получим:

$$K_3(p) = W_3(p) / [1 + W_3(p)] = W_1(p)W_6(p) / [1 + W_1(p)W_6(p)];$$

$$K_6(p) = W_6(p) / [1 + W_6(p)W_1(p)],$$

где $W_3(p) = Z(p)/F_3(p)$; $W_6(p) = Z(p)/F_6(p)$; $W_1(p) = Y(p)/X(p)$

Уравнение замкнутой САУ по принципу суперпозиции относительно $Z(p)$ и уравнение ошибки управления имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} Z(p) &= K_3(p)F_3(p) + K_6(p)F_6(p); \\ X(p) &= F_3(p) - Z(p) = [1 - K_3(p)]F_3(p) - K_6(p)F_6(p). \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

Это справедливо также для отдельных звеньев с обратной связью.

При наличии дополнительных воздействий, приложенных к различным точкам САУ, необходимо определить соответствующее ПФ по этим воздействиям и добавить в уравнение. Если н.у. для некоторых элементов отличны от нуля, то их можно рассматривать как дополнительные воздействия, приложенные ко входу этих элементов (звеньев).

С помощью структурных преобразований возмущающее воздействие может быть приведено к любой точке САУ, например, к выходу СЭ, или к выходу ОАУ.

Виды структур САУ

а) Обычная САУ (с жесткой ООС) изображена на рис. 2.6,в: $F_3(p)$ – задающее воздействие; $F_6(p)$ – возмущающее воздействие (помехи, нагрузка); $X(p)$ – ошибка; $Z(p)$ – выходной (управляемый) сигнал; $W_y(p)$ -ПФ УУ; $W_{OAV}(p)$ -ПФ ОАУ; $Z(p)$ и $X(p)$ -находятся по (2.15), где в этом случае :

$$K_3(p) = W_y(p) W_{OAV}(p) / [1 + W_y(p) W_{OAV}(p)];$$

$$K_6(p) = W_{OAV}(p) / [1 + W_y(p) W_{OAV}(p)].$$

б) САУ с ИПЭ в цепи ГОС (рис. 2.6,г). Здесь $Z(p)$ и $X(p)$ - также находятся по (2.15), имеем

$$K_3(p) = W_y(p) W_{OAV}(p) / [1 + W_y(p) W_{OAV}(p) W_{ИП}(p)];$$

$$K_6(p) = W_{OAV}(p) / [1 + W_y(p) W_{OAV}(p) W_{ИП}(p)].$$

в) САУ с ВПОС (рис. 2.6,д). Здесь $Z(p)$ и $X(p)$ - также находятся по (2.15), имеем

$$K_3(p) = W_{BOC}(p) W_{OAV}(p) / [1 + W_{BOC}(p) W_{OAV}(p)] =$$

$$= W_y(p) W_{OAV}(p) / [1 - W_y(p) W_K(p) + W_y(p) W_{OAV}(p)];$$

где $W_{BOC}(p) = W_y(p) / [1 - W_y(p) W_K(p)]$.

$$K_6(p) = W_{OAV}(p) / [1 + W_{BOC}(p) W_{OAV}(p)] =$$

$$= [1 - W_y(p) W_K(p)] W_{OAV}(p) / [1 - W_y(p) W_K(p) + W_y(p) W_{OAV}(p)].$$

з) Комбинированная САУ (рис. 2.6,е). В отличие от обычной САУ эта САУ содержит дополнительное воздействие по входу:

$F_{30}(p) = W_K(p)F_6(p)$. Уравнение имеет вид:

$$Z(p) = K_3(p)F_3(p) + K_6(p)F_6(p) + K_3(p) W_K(p)F_6(p) =$$

$$= K_3(p)F_3(p) + [K_6(p) + K_3(p) W_K(p)]F_6(p).$$

Если выбрать $W_K(p) = -K_6(p)/K_3(p)$, то $Z(p) = K_3(p)F_3(p)$, т.е. не зависит от $F_6(p)$.

д) САУ с моделью ОАУ (рис. 2.6,ж): На основании правила переноса точки суммирования по направлению вперёд эта схема преобразуется в САУ с ВПОС.

е) Разомкнуто-замкнутая САУ (рис. 2.6,з). Внешнее воздействие равно $F_6(p) + W_K(p)F_3(p)$, тогда получим:

$$Z(p) = K_3(p)F_3(p) + K_6(p)[F_6(p) + W_K(p)F_3(p)] = [K_3(p) + K_6(p)W_K(p)]F_3(p) + K_6(p)F_6(p).$$

При $W_K(p) = 1/W_{ОАУ}(p)$ САУ работает как разомкнутая, то есть возникает дополнительный канал передачи сигнала и $Z(p) = F_3(p)$. Роль ОС сводится к уменьшению всех дополнительных изменений в САУ.

ж) Комбинированная разомкнуто-замкнутая САУ (рис. 2.6,и) совмещает схемы рис. 2.6,ж,з:

$$Z(p) = [K_3(p) + K_6(p)W_{2K}(p)]F_3(p) + [K_6(p) + K_3(p)W_{1K}(p)]F_6(p).$$

Векторно-матричная форма представления САУ

Применение векторно-матричного математического описания упрощает не только запись уравнений динамики, но и их решение (особенно в случае многомерной, многосвязной САУ). В этом случае динамические процессы представляются через состояния системы, каждому из которых соответствует определенная точка в евклидовом пространстве. Решение во временной области будет иметь вид траектории движения этой точки.

Обычная САУ с жесткой ОС может быть изображена в виде (рис. 2.7), где все величины векторные, то есть являются множествами:

$$\vec{F}_3(p) = \begin{pmatrix} F_{31}(p) \\ F_{32}(p) \\ \dots \\ F_{3n}(p) \end{pmatrix}; \quad \vec{X}(p) = \begin{pmatrix} X_1(p) \\ X_2(p) \\ \dots \\ X_m(p) \end{pmatrix}; \quad \vec{Z}(p) = \begin{pmatrix} Z_1(p) \\ Z_2(p) \\ \dots \\ Z_r(p) \end{pmatrix}, \text{ и т. д.}$$

Уравнение САУ имеет вид:

$$\vec{Z}(p) = \vec{K}_3(p)\vec{F}_3(p) + \vec{K}_6(p)\vec{F}_6(p),$$

где

$$\vec{K}_3(p) = \begin{pmatrix} K_{311}(p) & \dots & K_{31n}(p) \\ \dots & \dots & \dots \\ K_{3n1}(p) & \dots & K_{3nn}(p) \end{pmatrix}; \quad \vec{K}_6(p) = \begin{pmatrix} K_{611}(p) & \dots & K_{61m}(p) \\ \dots & \dots & \dots \\ K_{6n1}(p) & \dots & K_{6nm}(p) \end{pmatrix};$$

$$K_{zi}(p) = W_{yi}(p)W_{(OAY)i}(p)/[1 + W_{yi}(p)W_{(OAY)i}(p)];$$

$$K_{ei}(p) = W_{(OAY)i}(p)/[1 + W_{yi}(p)W_{(OAY)i}(p)].$$

Здесь с индексом «i» обозначена ПФ по i-м воздействиям (задающему и возмущающему).

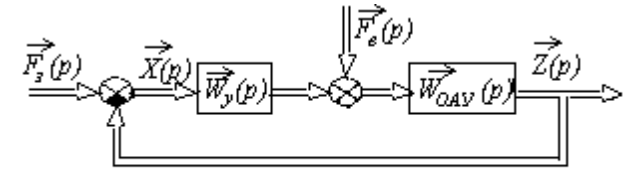


Рис.2.7. Структура обычной САУ с жесткой ОС в векторном изображении

Тема 3. Особенности нелинейных САУ

3.1. Определения. Методы линеаризации характеристик

Линейные САУ - это идеализированные модели реальных систем. Реальные САУ имеют различные нелинейности, которые присущи системе вследствие ограниченных энергетических ресурсов, погрешностей в изготовлении отдельных элементов, а также преднамеренно вводимые с целью улучшения динамических свойств САУ в целом.

Все нелинейности, которые можно сосредоточить в едином нелинейном элементе (НЭ), делятся на несущественные и существенные. Несущественные нелинейности - которыми можно пренебречь при определённых условиях (или линеаризовать, увеличивая число разбиений на линейные участки). Существенные нелинейности - пренебрежение которыми невозможно без искажений качественных явлений и свойств.

Как уже указывалось ранее, важнейшая особенность нелинейных САУ - неприменимость принципа суперпозиции. Это ограничивает применение основного математического аппарата теории линейных САУ - преобразований Лапласа и Фурье.

Нелинейные САУ значительно разнообразнее и сложнее, чем линейные (последние - это как бы небольшой островок в океане нелинейных систем). Нелинейную САУ с помощью структурных преобразований можно всегда представить в виде структурной алгоритмической схемы, выделив НЭ (рис. 3.1) Здесь $y(t) = \Phi(x(t))$ - функция преобразования НЭ; $W(p)$ - передаточная функция линейной части САУ.

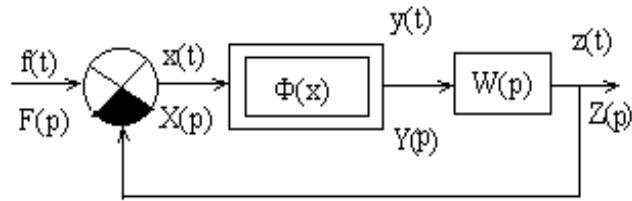


Рис. 3.1. Структурная схема нелинейной САУ

Все НЭ делятся на 2 группы: 1) неизбежно присутствующие в САУ, или естественные; 2) преднамеренно вводимые, или искусственные.

К первой группе относятся НЭ, имеющие функцию преобразования типа «насыщения», «зона нечувствительности», «гистерезис» (рис.3.2). Первые две характеристики присущи любому усилителю.

Насыщение в усилителях наступает при больших значениях входных сигналов x из-за ограниченной мощности источников энергии, питающих усилители. У каждого усилителя имеется зона нечувствительности, когда они не реагируют на слишком малые значения сигналов.

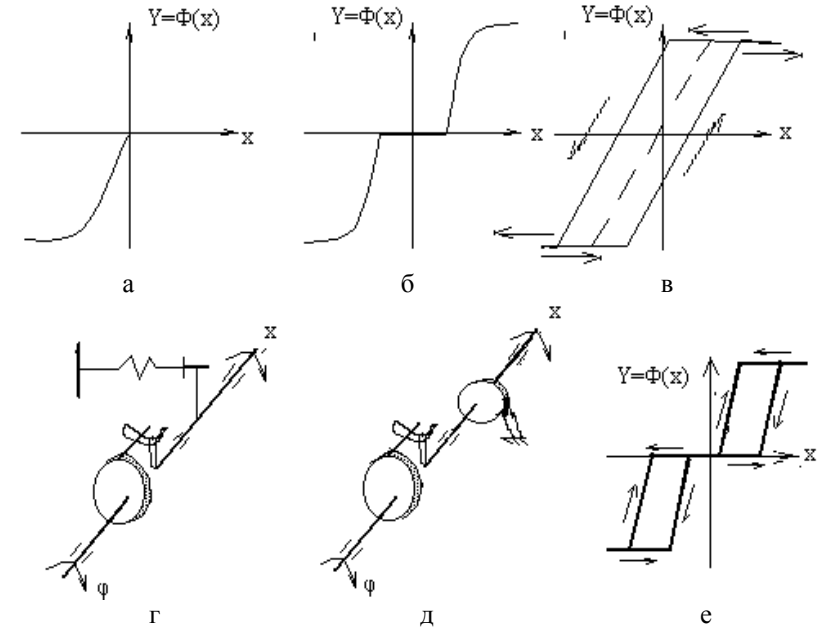


Рис.3.2. Виды функций преобразования НЭ: а - насыщение, б - зона нечувствительности, в - гистерезис; г - пример НЭ «зона нечувствительности»; д - пример НЭ «гистерезис»; е - функция преобразования НЭ «гистерезис + зона нечувствительности»

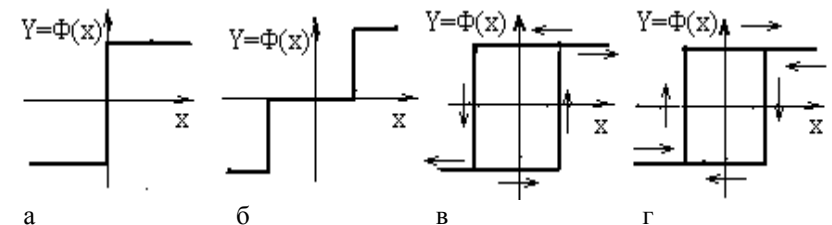


Рис.3.3. Релейные характеристики НЭ: а - идеальная релейная, б - идеальная релейная с зоной нечувствительности, в - релейная с положительным гистерезисом, г - релейная с отрицательным гистерезисом

Ко второй группе НЭ относятся элементы с различными релейными характеристиками (рис.3.3).

Для схемы (рис.3.1) имеем:

$$Z(p)=W(p)Y(p) \text{ - для линейной части,} \quad (3.1)$$

$$\text{где } Y(p)=L\{\Phi[x(t)]\}=\int_0^t \Phi[x(t)]e^{-Pt} dt; \quad W(p)=P(p)/Q(p) \text{ - пере-}$$

даточная функция линейной части; $x(t)=f(t) - z(t)$ – для оригиналов;

$$X(p)=F(p) - Z(p) \text{ - для изображений;}$$

После подстановки получим:

$$\left. \begin{aligned} Z(p) &= W(p)L\{\Phi[f(t) - z(t)]\} \\ X(p) &= F(p) - W(p)L\{\Phi[x(t)]\} \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

Уравнения (3.2) нелинейные. При переходе к оригиналам, с учётом теорем линейности и свёртывания, получим:

$$\left. \begin{aligned} Z(t) &= \int_0^t w(t - \tau)\Phi[f(z(t))d\tau; \\ x(t) &= f(t) - \int_0^t w(t - \tau)\Phi[f(z(t))d\tau. \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

Общих методов решения нелинейных уравнений (3.2) или интегральных нелинейных (3.3) не существует. Они, как правило, решаются на ЭВМ. Так как все возмущающие воздействия можно привести к точке приложения задающего воздействия, то достаточно рассмотреть САУ при одном воздействии $f(t)$.

Свободный процесс в нелинейных САУ существенно зависит от вынужденного процесса $x_{вын}(t)$, а значит и от внешнего воздействия. При отсутствии внешнего ограниченного воздействия нелинейные САУ имеют несколько состояний равновесия и специфических автономных периодических процессов – автоколебаний.

Максимальное отклонение процесса в нелинейной САУ от процесса в линеаризованной системе определяется величиной наибольшего отличия нелинейной характеристики от линейной, коэффициентом усиления линейного элемента и площадью абсолютной величины временной характеристики в линеаризованной системе.

Состояние равновесия, вынужденные процессы и автоколебания в САУ могут реально существовать лишь в том случае, когда они устойчивы. Устойчивость этих режимов определяется характером изменений отклонений, вызванных приложением к системе убывающих воздействий. Если эти отклонения стремятся с течением времени к нулю, то соответствующие режимы устойчивы. Возникающие отклонения представляют собой не что иное, как свободные процессы. Поэтому исследование устойчивости сводится к исследованию свобод-

ных процессов. В отличие от линейных в нелинейных САУ свободный процесс существенно зависит от рассматриваемых режимов. При этом возможно, что один режим устойчив, а другой – нет. Поэтому устойчивость состояния равновесия, вынужденных процессов и автоколебаний необходимо рассматривать отдельно.

Для состояния равновесия $x_{вын}(t) = x_{вын} = x^a = 0$ уравнение свободного процесса принимает вид:

$$x_{ce}(t) = f_{\downarrow}^0(t) - \int_0^t w(t - t)\Phi[x_{ce}(t)] dt, \quad (3.4)$$

где $f_{\downarrow}^0(t)$ – убывающее воздействие.

Считается, что состояние равновесия устойчиво, если для убывающих внешних воздействий $f_{\downarrow}^0(t)$ таких, что

$$\sup |f_{\downarrow}^0(t)| = \eta < \infty, \quad (3.5)$$

свободный процесс $x_{ce}(t)$, определяемый уравнением (3.4), ограничен и удовлетворяет условию:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_{ce}(t) = 0. \quad (3.6)$$

1) Если в (3.5) величина η – принимается достаточно малой, то состояние равновесия "устойчиво в малом".

2) Если в (3.5) η – конечная фиксированная величина, то состояние равновесия "устойчиво в большом".

3) Если в (3.5) η – может быть любой величиной, то состояние равновесия "устойчиво в целом".

4) Состояние равновесия "абсолютно устойчиво", если оно "устойчиво в целом" (п.3), но не для одной фиксированной характеристики НЭ, а для некоторого семейства этих характеристик, принадлежащих к какому-либо классу. Здесь воздействие $f_{\downarrow}^0(t)$ – реакция линейной части САУ на ненулевые начальные состояния.

Для конкретного *вынужденного* процесса $x_{вын}(t)$ все определения устойчивости состояния равновесия остаются справедливыми для устойчивости вынужденных процессов, если левую часть неравенства (3.5) заменить на $\sup |f_{\downarrow}^0(t) + f_{\downarrow}(t)|$, а вместо состояния равновесия говорить "вынужденный процесс".

Линеаризация НЭ - это замена нелинейной статической характеристики $y = \Phi(x)$ линеаризованной:

$$y = k^{(\#)}(\#)x, \quad (3.7)$$

где $k^{(\#)}(\#)$ – коэффициент линеаризации, причём аргумент $k^{(\#)}(\#)$ зависит от вида линеаризации. Различают 4 вида линеаризации: статическую, дифференциальную, гармоническую и стохастическую.

Коэффициент статической линейаризации $k^{(c)}(x)$ равен:

$$k^{(c)}(x) = y/x = \Phi(x)/x. \quad (3.8)$$

Уравнение статически линейаризованного элемента:

$$y^{\wedge} = k^{(c)}(x)x = [\Phi(x)/x]x, \quad (3.9)$$

т.е., это иная форма записи уравнения НЭ.

Если принять $k^{(c)}(x) = const$, то (3.9) будет линейной аппроксимацией характеристики $y = \Phi(x)$.

Коэффициент дифференциальной линейаризации $k^{(o)}(x)$ равен:

$$k^{(o)}(x) = dy/dx = d\Phi(x)/dx. \quad (3.10)$$

Уравнение дифференциально линейаризованного элемента:

$$y^{\wedge} = k^{(o)}(x)x = [d\Phi(x)/dx]x. \quad (3.11)$$

Это уравнение – линейная аппроксимация характеристики $y = \Phi(x)$ при малых изменениях входной величины x относительно некоторого значения аргумента.

Пусть $x(t)$ изменяется по гармоническому закону: $x(t) = Asin\omega t$, тогда $y(t) = \Phi(Asin\omega t)$ – периодическая функция времени.

Коэффициенты гармонической линейаризации $k_s^{(c)}$, $k_c^{(c)}$ определяются из условия наилучшего квадратического приближения $y(t)$ гармонически изменяющейся величиной

$$y^{\wedge}(t) = A[k_s^{(c)}sin\omega t + k_c^{(c)}cos\omega t], \quad (3.12)$$

т.е. из условия

$$\int_0^{2\pi} [y(t) - y^{\wedge}(t)]^2 d\omega t \rightarrow \min_{k_s^{(c)}, k_c^{(c)}}, \quad (3.13)$$

или

$$\int_0^{2\pi} \{ \Phi(Asin\omega t) - A[k_s^{(c)}sin\omega t + k_c^{(c)}cos\omega t] \}^2 d\omega t \rightarrow \min_{k_s^{(c)}, k_c^{(c)}}. \quad (3.14)$$

Дифференцируя левую часть (3.14) по $k_s^{(c)}$, $k_c^{(c)}$ и приравнявая результат к нулю, получим:

$$\int_0^{2\pi} \{ \Phi(Asin\omega t) - A[k_s^{(c)}sin\omega t + k_c^{(c)}cos\omega t] \} sin\omega t d\omega t = 0; \quad (3.15)$$

$$\int_0^{2\pi} \{ \Phi(Asin\omega t) - A[k_s^{(c)}sin\omega t + k_c^{(c)}cos\omega t] \} cos\omega t d\omega t = 0. \quad (3.15')$$

Учитывая, что

$$\int_0^{2\pi} sin\omega t cos\omega t d\omega t = 0; \int_0^{2\pi} sin^2\omega t d\omega t = \int_0^{2\pi} cos^2\omega t d\omega t = \pi, \text{ получим:}$$

$$k_s^{(c)} = k_s^{(c)}(A) = \frac{1}{\pi A} \int_0^{2\pi} \{ \Phi(Asin\omega t) sin\omega t d\omega t, \quad (3.16)$$

$$k_c^{(c)} = k_c^{(c)}(A) = \frac{1}{\pi A} \int_0^{2\pi} \{ \Phi(Asin\omega t) cos\omega t \} sin\omega t d\omega t. \quad (3.16')$$

Величину (3.12) можно также записать в виде:

$$y^{\wedge}(t) = Ak^{(c)}(A) sin(\omega t - \psi(A)), \quad (3.17)$$

где $k^{(c)}(A) = \{ [k_s^{(c)}(A)]^2 + [k_c^{(c)}(A)]^2 \}^{1/2}$, $\psi(A) = -arctg[k_s^{(c)}(A)/k_c^{(c)}(A)]$, или в показательной форме записи комплексного числа $\bar{X}(t) = ae^{i\omega t}$, окончательно получаем:

$$\bar{y}^{\wedge}(t) = k^{(c)}(A)\bar{x}(t), \quad (3.18)$$

где $k^{(c)}(A) = k_s^{(c)}(A) - jk_c^{(c)}(A) = k^{(c)}(A)exp[-j\psi(a)]$,

Коэффициенты гармонической линейаризации $k_s^{(c)}$ и $k_c^{(c)}$ – представляют собой отношение коэффициентов первой гармоники разложения в ряд Фурье периодической функции $y(t) = \Phi(Asin\omega t)$ к амплитуде входного гармонического воздействия.

Пусть $x(t)$ – стационарный случайный процесс, тогда $y(t) = \Phi[x(t)]$ – также стационарный случайный процесс.

Коэффициент стохастической линейаризации $k^{(cm)}$ определяется из условия наилучшего среднеквадратического приближения $y(t)$ величиной $y^{\wedge}(t) = k^{(cm)}x(t)$, т.е. из условия:

$$M\{ [y(t) - y^{\wedge}(t)]^2 \} \rightarrow \min_{k^{(cm)}} \text{ или} \quad (3.19)$$

$$M\{ [\Phi(x(t)) - k^{(cm)}x(t)]^2 \} \rightarrow \min_{k^{(cm)}}. \quad (3.20)$$

Дифференцируя левую часть (3.20) по $k^{(cm)}$ и приравнявая её к нулю, получим:

$$M\{ [\Phi(x(t)) - k^{(cm)}x(t)] x(t) \} = 0.$$

С учётом того, что $M\{ \Phi(x(t)) x(t) \} = B_{yx}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(x)x p(x) dx$,

$$M\{ x^2(t) \} = R_{xx}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 p(x) dx = \sigma_x^2,$$

где $B_{yx}(0)$ и $R_{xx}(0)$ – начальные значения взаимной и авто-корреляционной функций, получим:

$$k^{(cm)} = k^{(cm)}(\sigma_x^2) = 1/\sigma_x^2 \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(x)x p(x) dx. \quad (3.21)$$

Так как для стационарных эргодических процессов $B_{yx}(0)$ и $R_{xx}(0)$ можно также представить в виде:

$$B_{yx}(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \Phi(x(t))x(t) dt; \quad (3.22)$$

$$R_{xx}(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x^2(t) dt = \sigma_x^2, \quad (3.22')$$

то (3.21) можно в этом случае определить так:

$$k^{(cm)} = k^{(cm)}(\sigma_x) = \frac{1}{\sigma_x^2} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \Phi(x(t))x(t)dt . \quad (3.23)$$

В частном случае, если $x(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$, то $R_{xx}(0) = \sigma_x^2 = A^2/2$;

$$B_{yx}(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \Phi[A \sin(\omega t + \varphi) A \sin(\omega t + \varphi)] dt = k_s^{(e)}(A) \sigma_x^2$$

и значит $k^{(cm)}(\sigma_x) = k_s^{(e)}(A)$, т.е. коэффициенты стохастической и гармонической линеаризации совпадают.

3.2. Особенности дискретных САУ

Дискретизация сигналов по времени (квантование по времени) состоит в замене непрерывной функции (рис.3.4,а) её значениями в фиксированные моменты времени, отстоящие друг от друга на интервал квантования (дискретизации) по времени (рис.3.4,б). Дискретизация (квантование) сигналов по уровню, состоит в замене непрерывной функции её значениями при заранее фиксированных уровнях, которые отстают друг от друга на интервал квантования по уровню (рис.3.4,в). Дискретизация сигналов по времени и по уровню (кодирование) состоит в замене непрерывной функции её значениями в заранее заданные фиксированные моменты и заранее заданных уровнях (рис.3.4,г).

Если хотя бы одна из величин, характеризующих состояние САУ, квантуется по времени, то такие САУ называются *импульсными*, если по уровню - *релейными*, если по времени и по уровню - *цифровыми*.

Квантование по времени заменяет непрерывную функцию решетчатой, которая определяется совокупностью выделенных ординат (дискрет). Эти ординаты модулируют некоторую последовательность импульсов. Такие устройства называются модуляторами. Входной величиной импульсного модулятора является непрерывная величина, выходной – модулированная последовательность импульсов. Модуляция сводится к изменению какого-либо параметра импульсов (амплитуды, длительности, ширины).

Импульсную САУ (ИСАУ) можно представить в виде соединения импульсного элемента и её непрерывной части (рис.3.5,а). Амплитудно-импульсные САУ (АИСАУ) могут быть как линейными, так и при наличии НЭ – нелинейными. Широтно-импульсные САУ (ШИСАУ) принципиально нелинейные, цифровые САУ также нелинейные (рис.3.5,б).

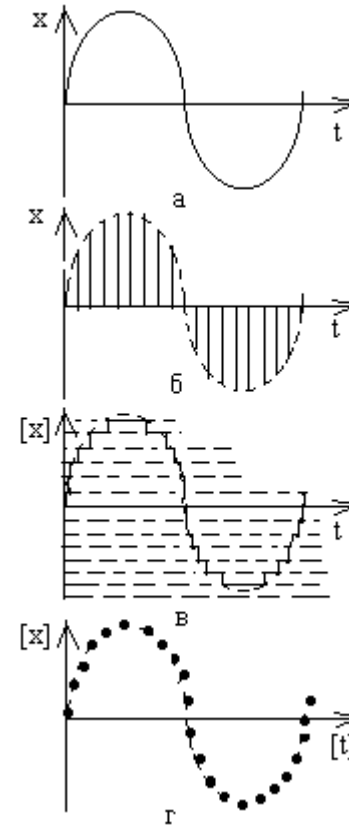


Рис.3.4. Дискретизация аналогового (а) сигнала: б - по времени. в - по уровню; г - его кодирование по уровню и по времени

Любой ИЭ с произвольной формой импульсов $s(t)$ всегда может быть представлен в виде последовательного соединения простейшего ИЭ и некоторого формирующего устройства (рис.3.6,а), реакция которого на импульсные воздействия равна $s(t)$. Простейший ИЭ (ПИЭ) – сигнал на выходе которого $x^*(t)$ представляет собой последовательность δ - функций, «площади» которых равны дискретным значениям выходной величины $x(mT)$; $m=1,2,\dots$.

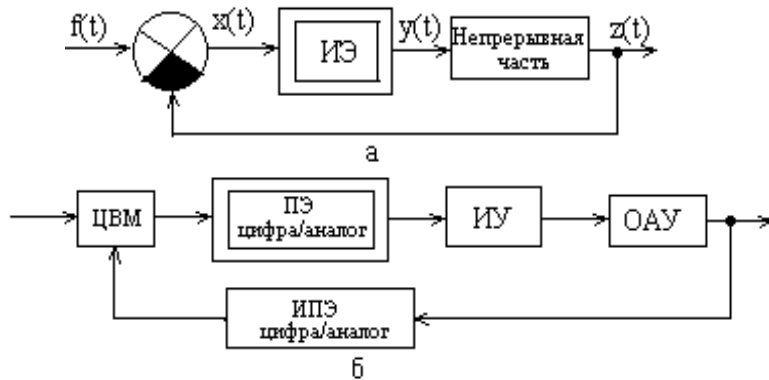


Рис.3.5. Структурные схемы: а - ИСАУ; б - цифровой САУ

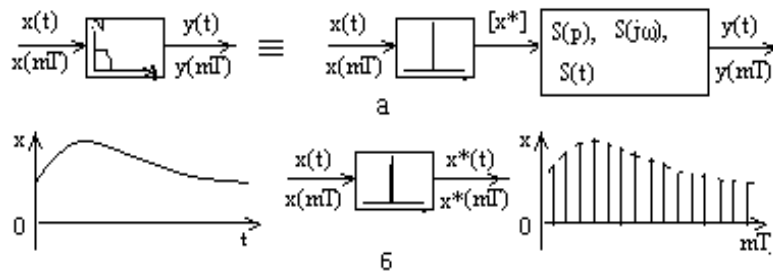


Рис.3.6: а - преобразование структуры ИЭ; б - представление ПИЭ как модулятора δ-функций

Например, для импульсов прямоугольной формы:

$$s(t) = K_{\phi} \text{ при } 0 \leq t < T; 0 \text{ при } T \leq t < \infty;$$

$$S(p) = K_{\phi} [(1/p) - (e^{-pT}/p)] = K_{\phi} (1 - e^{-pT})/p;$$

$$S(j\omega) = K_{\phi} (1 - e^{-j\omega T})/j\omega = K_{\phi} \{ \sin(\omega T/2) / (\omega/2) \} e^{-j(\omega T/2 - k\pi)}.$$

ПИЭ можно рассматривать также как модулятор δ -функций (рис.3.6,б). Модуляция состоит в умножении входного сигнала – огибающей $x(t)$ на немодулированную последовательность

$$\delta^*_T(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(t - mT). \text{ Следовательно, выходной сигнал ПИЭ}$$

$x^*(t)$, представляющий собой модулированную последовательность δ -функций, будет равен $x^*(t) = x(t) \delta^*_m(t)$. Изображение непрерывного входного сигнала:

$$X(p) = L\{x(t)\} = \int_0^{\infty} x(t) \exp(-pt) dt,$$

на выходе ИПЭ

$$X^*(p) = L\{x^*(t)\} = L\{x(t) \delta^*_T(t)\} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} L\{x(t) \delta(t - mT)\} =$$

$$= \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(mT) L\{\delta(t - mT)\} = \sum_{m=1}^{\infty} x(mT) \exp(-pmT) = D\{x(mT)\} = D\{x\}.$$

Это выражение получено с учётом того, что $\delta(t) = 0$ при $t \neq mT$ и $L\{\delta(t - mT)\} = \int_0^{\infty} \delta(t - mT) \exp(-pt) dt = e^{-pmT}$; $x(t) \equiv 0$ при $t \leq 0$.

Выражение $D\{x\} = \sum_{m=1}^{\infty} x(mT) \exp(-pmT)$ называется дискретным преобразованием Лапласа (D - преобразованием).

3.3. Основные характеристики импульсных систем

Законы управления

Простейшие законы управления, такие, как пропорциональный (П), интегральный (И), пропорционально-интегральный (ПИ), могут формироваться в непрерывной части системы подобно тому, как это делалось в непрерывных автоматических системах. Изменение характеристик непрерывной части системы в конечном итоге влияет на свойства замкнутой системы в целом. По аналогии с подобными непрерывными законами управления можно формировать дискретные законы регулирования в дискретном фильтре или ЦВУ путём выбора передаточной функции $W^*_{\text{дф}}(p) = W^*_{\text{цву}}(p) = W^*_{\text{к}}(p)$. Так, при

$$W^*_{\text{к}}(p) = k_0 + \frac{k_{-1}}{1 - e^{-pT}} + k_1 (1 - e^{-pT}) \quad (3.24)$$

мы получаем пропорциональный суммарно-разностный (ПСР) закон управления. Составляющие, входящие в (3.24),

$$\frac{1}{1 - e^{-pT}} = \frac{e^{pT}}{e^{pT} - 1} \text{ и } 1 - e^{-pT} = \frac{e^{pT} - 1}{e^{pT}} \quad (3.25)$$

соответствуют суммированию и взятию первой разности входной решетчатой величины.

В отличие от операции дифференцирования, которая не может быть точно осуществлена, взятие разности не представляет особого труда. Представляя (3.24) в (3.25), получим после приведения к общему знаменателю

$$W^*_{\text{к}}(p) = \frac{(k_0 + k_{-1} + k_1) e^{2pT} - (k_0 + k_1) e^{pT} + k_1}{e^{2pT} - e^{pT}}.$$

Отсюда видно, что стандартные законы управления соответствуют выбору конкретных видов коэффициентов передаточных функций дискретного фильтра или ЦВУ. В общем же случае дискретные фильтры и ЦВУ позволяют реализовать разнообразные сложные законы управления, что открывает широкие возможности получения высококачественных импульсных систем управления. Поэтому целесообразно далее рассмотреть структуру импульсной автоматической системы, которая содержит дискретный фильтр или ЦВУ в контуре управления.

Дискретные передаточные функции разомкнутых импульсных систем

В отличие от непрерывных систем, для которых передаточные функции составляются непосредственно по уравнениям элементов, в импульсных системах передаточные функции определяются по временной характеристике или передаточной функции непрерывной части. Соответствие между ними устанавливается D- или Z- преобразованиями. Так, если передаточная функция приведенной непрерывной части равна

$$W(p) = S(p)W_n(p),$$

то передаточная функция разомкнутой импульсной системы $W^*(p)$, которую мы будем называть для краткости дискретной передаточной функцией, находится в результате Z-преобразования от $W(p)$, т. е.

$$W^*(p) = Z\{W^*(p)\} = D\{S(p)W_n(p)\}.$$

Для прямоугольной формы импульса

$$S(p) = \frac{1 - e^{-pT}}{p}.$$

И значит, согласно определению Z-преобразования,

$$W^*(p) = \frac{\omega_0}{2\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{1 - e^{-(p-jk\omega_0 T)}}{p - jk\omega_0 T} W_n(p - jk\omega_0 T) \quad (3.26)$$

Предполагаем, что начальное значение импульсной характеристики непрерывной части равно нулю, т. е. $\omega_n(0) = 0$. В противном случае к правой части следует добавить слагаемое $\omega_n(0)/2$. Тогда получим, что

$$W^*(p) = \frac{\omega_n(0)}{2} + \frac{\omega_0}{2\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{1 - e^{-(p-jk\omega_0 T)}}{p - jk\omega_0 T} W_n(p - jk\omega_0 T). \quad (3.27)$$

Соотношения (3.26), (3.27) определяют дискретную передаточную функцию разомкнутой импульсной системы через передаточную функцию непрерывной части в виде бесконечного ряда. Можно найти

выражение дискретной передаточной функции разомкнутой импульсной системы в конечной форме.

Предположим, что в общем случае

$$W_n(p) = \frac{P(p)}{Q(p)}, \quad (3.28)$$

где $P(p)$, $Q(p)$ - многочлены степени n_1 и n соответственно. Обозначая через p_1, p_2, \dots, p_n полюсы передаточной функции и предполагая их отличными друг от друга, представим (3.28) в виде разложения:

$$W_n(p) = \sum_{v=1}^n \frac{P(p_v)}{Q'(p_v)} \frac{1}{p - p_v}. \quad (3.29)$$

Подставляя в выражение для $W^*(p)$, получим

$$W^*(p) = Z \left\{ \frac{1 - e^{-pT}}{p} \sum_{v=1}^n \frac{P(p_v)}{Q'(p_v)} \frac{1}{p - p_v} \right\}.$$

Меня последовательность суммирования и взяв Z-преобразования и вынося за знак Z-преобразования функции e^{pT} на основании теорем Z-преобразования, получим

$$W^*(p) = \sum_{v=1}^n \frac{P(p_v)}{p_v Q'(p_v)} (1 - e^{-pT}) Z \left\{ \frac{P_v}{p(p - p_v)} \right\}. \quad (3.30)$$

Но поскольку $\frac{P_v}{p(p - p_v)} = \frac{1}{p - p_v} - \frac{1}{p}$, то

$$Z \left\{ \frac{P_v}{p(p - p_v)} \right\} = D \left\{ \frac{1}{p - p_v} \right\} - D \left\{ \frac{1}{p} \right\}.$$

Пользуясь таблицей соответствий Z-преобразования, получаем

$$Z \left\{ \frac{P_v}{p(p - p_v)} \right\} = \frac{e^{pT}}{e^{pT} - e^{p_v T}} - \frac{e^{pT}}{e^{pT} - 1} = - \frac{e^{pT} (1 - e^{p_v T})}{(e^{pT} - 1)(e^{pT} - e^{p_v T})}. \quad (3.31)$$

Подставляя (3.31) в (3.30), после очевидных преобразований получим

$$W^*(p) = - \sum_{v=1}^n \frac{P(p_v)}{p_v Q'(p_v)} \frac{1 - e^{p_v T}}{e^{pT} - e^{p_v T}}. \quad (3.32)$$

Если один из полюсов $W_n(p)$, например p_n , равен нулю ($p_n=0$), то n -е слагаемое в (3.29) становится неопределенным. Раскрывая неопределенность, получим

$$\lim_{p_n \rightarrow 0} \frac{P(p_n)}{p_n Q'(p_n)} \frac{1 - e^{p_n T}}{e^{pT} - e^{p_n T}} = T \frac{P(0)}{Q'(0)} \frac{1}{e^{pT} - 1}.$$

Неопределенность возникает также при наличии кратных полюсов. Она может быть раскрыта обычным способом.

Передаточную функцию разомкнутой импульсной системы (3.32) можно представить в виде дробно-рациональной функции. Из (3.27) или (3.32) следует, что

$$W^*(p + jk\omega_0) = W^*(p), \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3.33)$$

Это значит, что дискретная передаточная функция $W^*(p)$ представляет собой периодическую функцию вдоль мнимой оси комплексной плоскости p (рис.3.7). Назовем полосу $-\frac{\omega_0}{2} < \text{Im} p \leq \frac{\omega_0}{2}$

основной. Задание $W^*(p)$ в основной полосе в силу периодичности (3.33) полностью определяет $W^*(p)$. Полюсы и нули передаточной функции, лежащие в основной полосе (на рис.3.7 они изображены крестиками и жирными точками соответственно), будем называть *основными*. Если полюсы p_1, p_2, \dots, p_n передаточной функции непрерывной части системы таковы, что $-\frac{\omega_0}{2} < \text{Im} p_v \leq \frac{\omega_0}{2}$, то они совпадают с

основными полюсами $W^*(p)$. В общем случае дискретную передаточную функцию разомкнутой системы можно представить в виде дроби $W^*(p) = \frac{P^*(p)}{Q^*(p)}$, где $Q^*(p)$ и $P^*(p)$ – многочлены e^{pT} степени n и $n-1$ соответственно. Таким образом, импульсная передаточная функция имеет n полюсов и $n-1$ нулей.

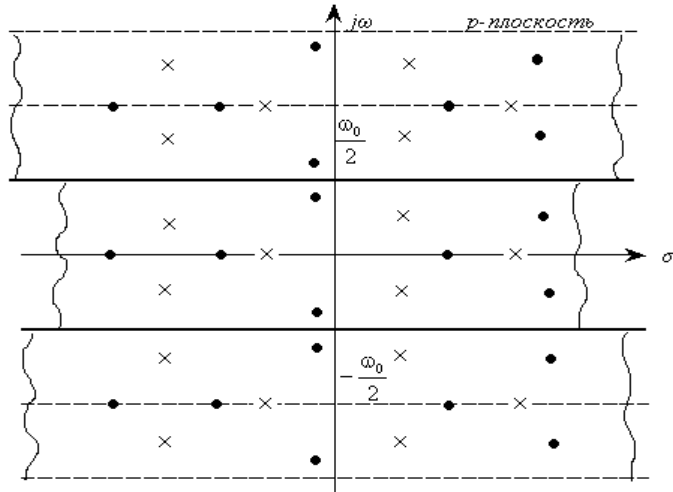


Рис.3.7. Представление дискретной передаточной функции на комплексной плоскости

Дискретную передаточную функцию часто удобно представить в форме

$$W^*(p) = \frac{k_s}{(e^{pT} - 1)^s} \frac{\tilde{P}^*(p)}{\tilde{Q}_s^*(p)},$$

где $\tilde{Q}_s^*(p)$ и $\tilde{P}^*(p)$ – нормированные многочлены степени $n-s$ и $n-1$ соответственно, т. е. такие, что $\frac{\tilde{P}^*(0)}{\tilde{Q}_s^*(0)} = 1$, а k_s – коэффициент усиления разомкнутой импульсной системы.

Введём следующие числовые показатели дискретной передаточной функции.

1. *Порядок* n определяется степенью знаменателя дискретной передаточной функции $W^*(p)$.
2. *Степень* r_c определяется разностью степеней знаменателя и числителя дискретной передаточной функции $W^*(p)$. Как правило, степень $W^*(p)$ равна $r_c = n - (n-1) = 1$.
3. *Индекс неустойчивости* s_u определяется числом правых полюсов $W^*(p)$.
4. *Индекс астатизма* s_a определяется числом полюсов $W^*(p)$, равных нулю.
5. *Индекс неминимально-фазности* $s_{нф}$ определяется числом правых нулей $W^*(p)$.

Через эти числовые показатели далее будут выражены различные свойства импульсных систем.

Дискретные передаточные функции типовых импульсных систем

Найдём передаточные функции ряда конкретных типовых импульсных систем.

Рассмотрим импульсную систему первого порядка (рис.3.8, а), состоящую из импульсного элемента с прямоугольной формой импульса и линейной части, передаточная функция которой равна

$$W_u(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}.$$

Передаточная функция формирующего устройства в этом случае равна

$$S(p) = \frac{1 - e^{-pT}}{p}.$$

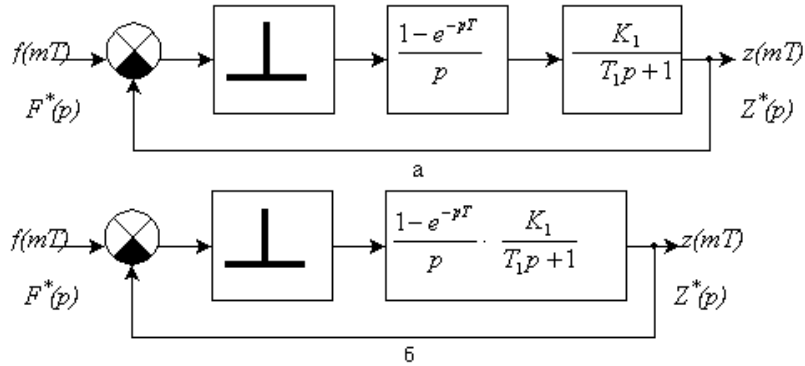


Рис.3.8. Структурная схема импульсной системы 1-го порядка: а – исходная; б – преобразованная

Таким образом, передаточная функция приведенной непрерывной части (рис.3.8,б) имеет вид

$$W(p) = S(p)W_n(p) = \frac{1 - e^{-pT}}{p} \frac{k_1}{T_1 p + 1}. \quad (3.34)$$

Для определения передаточной функции разомкнутой импульсной системы $W^*(p)$ подвергнем (3.34) Z-преобразованию:

$$W^*(p) = Z\{W(p)\} = Z\left\{\frac{1 - e^{-pT}}{p} \frac{k_1}{T_1 p + 1}\right\}. \quad (3.35)$$

Вынося, согласно теореме 5 приложения 3, за знак Z-преобразования функции от e^{-pT} и разлагая выражение под знаком Z-преобразования на простейшие дроби, получаем

$$\frac{1}{p(T_1 p + 1)} = \frac{1}{p} - \frac{1}{p + \frac{1}{T_1}},$$

$$Z\left\{\frac{1}{p(T_1 p + 1)}\right\} = \frac{e^{pT}}{e^{pT} - 1} - \frac{e^{pT}}{e^{pT} - e^{-T/T_1}}.$$

Подставляя это выражение в (3.35), получим после элементарных преобразований передаточную функцию разомкнутой системы:

$$W^*(p) = k_1 \frac{1 - e^{-T/T_1}}{e^{pT} - e^{-T/T_1}}.$$

Числовые характеристики этой передаточной функции таковы:

порядок $n=1$, степень $r_c=1$, индекс неустойчивости $s_n=0$, индекс неминимально-фазовости $s_{нф}=0$, индекс астатизма $s_a=0$.

Передаточная функция замкнутой импульсной системы (рис.3.8) равна

$$K^*(p) = \frac{W^*(p)}{1 + W^*(p)} = \frac{k(1 - e^{-T/T_1})}{e^{pT} - e^{-T/T_1} + k_1(1 - e^{-T/T_1})}.$$

Рассмотрим импульсную систему второго порядка (рис.3.9), состоящую из простейшего импульсного элемента и линейной части, передаточная функция которой равна

$$W_n(p) = \frac{k_1}{p(T_1 p + 1)}.$$

Формирующее устройство в этом случае отсутствует, т. е.

$$S(p) = 1.$$

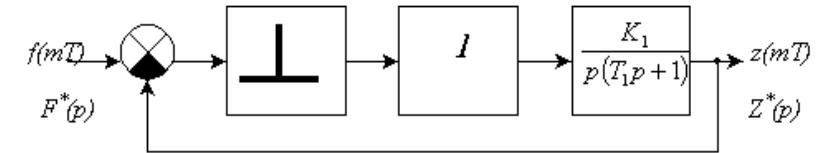


Рис.3.9. Структурная схема импульсной системы 2-го порядка

Поэтому передаточные функции приведенной и неприведенной непрерывных частей совпадают, т. е.

$$W(p) = W_n(p) = \frac{k_1}{p(T_1 p + 1)},$$

и, следовательно,

$$W^*(p) = Z\left\{\frac{k_1}{p(T_1 p + 1)}\right\} = k_1 \left\{\frac{e^{pT}}{e^{pT} - 1} - \frac{e^{pT}}{e^{pT} - e^{-T/T_1}}\right\},$$

или, после преобразования,

$$W^*(p) = \frac{k_1(1 - e^{-T/T_1})e^{pT}}{(e^{pT} - 1)(e^{pT} - e^{-T/T_1})}.$$

Числовые характеристики этой передаточной функции таковы: порядок $n=2$, степень $r_c=1$, индекс неустойчивости $s_n=0$, индекс неминимально-фазовости $s_{нф}=1$.

Передаточная функция замкнутой системы будет равна

$$K^*(p) = \frac{W^*(p)}{1+W^*(p)} = \frac{k_1(1-e^{-T/T_1})e^{pT}}{e^{2pT} - [1+e^{-T/T_1} - k_1(1-e^{-T/T_1})]e^{pT} + e^{-T/T_1}}.$$

3.4. Уравнения импульсных систем

Зная передаточные функции замкнутых систем, можно уравнения этих замкнутых систем относительно изображений записать в виде

$$Z^*(p) = K^*(p)F^*(p). \quad (3.36)$$

По определению дискретного преобразования Лапласа

$$K^*(p) = D\{k(mT)\},$$

где $k(mT)$ - оригинал, соответствующий изображению $K^*(p)$.

Исходя из уравнения относительно изображений (3.36), на основании теоремы свертывания получим уравнение импульсной системы относительно оригиналов:

$$z(mT) = \sum_{s=0}^m k(sT)f((m-s)T) \quad (3.37)$$

или, что эквивалентно,

$$z(mT) = \sum_{s=0}^m k((m-s)T)f(sT). \quad (3.38)$$

Эти уравнения определяют процессы в замкнутой импульсной системе при произвольном внешнем воздействии $f(mT)$. Уравнения (3.37), (3.38) определяют процесс в импульсной системе через временную характеристику замкнутой системы в явной форме. Предположим, что внешнее воздействие кратковременно, т. е.

$$f(mT) = \sigma(mT) = \begin{cases} 1, & m=0 \\ 0, & m>0 \end{cases}$$

Тогда из уравнения (3.38) получаем

$$z(mT) = \sum_{s=0}^m k((m-s)T)\sigma(sT),$$

откуда следует, что реакция замкнутой импульсной системы на импульсное решетчатое воздействие определяется временной решетчатой функцией $k(mT)$. Назовем $k(mT)$ *временной характеристикой* замкнутой импульсной системы. Найдём явное выражение для временной характеристики. Передаточная функция замкнутой импульсной системы равна

$$K(p) = \frac{W^*(p)}{1+W^*(p)}, \quad (3.39)$$

а $W^*(p) = \frac{P^*(p)}{Q^*(p)}$, где Q^* и P^* -многочлены по e^{pT} степени n и $n-1$ соответственно.

Подставляя $W^*(p)$ в (3.39), получим

$$K^*(p) = \frac{P^*(p)}{Q^*(p)+P^*(p)} = \frac{H^*(p)}{G^*(p)}.$$

Знаменатель передаточной функции замкнутой импульсной системы $G^*(p) = Q^*(p) + P^*(p)$ определяет характеристический многочлен. Нулями характеристического многочлена являются полюсы передаточной функции. Предположим, что эти полюсы простые, и обозначим их как $e^{p_1T}, e^{p_2T}, \dots, e^{p_nT}$. Тогда передаточную функцию можно представить в виде разложения на простейшие дроби:

$$K^*(p) = - \sum_{v=1}^n \frac{H^*(p_v)}{\dot{G}^*(p_v)} \frac{1}{e^{pT} - e^{p_vT}}, \quad (3.40)$$

где $\dot{G}^*(p_v) = \left. \frac{dG^*(p)}{dp} \right|_{p=p_v}$.

Поскольку на основании теоремы запаздывания дискретного преобразования Лапласа

$$\frac{1}{e^{pT} - e^{p_vT}} = e^{-pT} \frac{e^{pT}}{e^{pT} - e^{p_vT}} \rightarrow \begin{cases} e^{p_v(m-1)T}, & m \geq 0, \\ 0, & m = 0, \end{cases}$$

то, переходя в (3.40) от изображений к оригиналам, получим

$$k(mT) = \sum_{v=1}^n \frac{H^*(p_v)}{\dot{G}^*(p_v)} e^{p_vT(m-1)T}, m \geq 1, \quad (3.41)$$

$$k(0) = 0,$$

причём формула разложения (3.41) определяет временную характеристику замкнутой системы по полюсам передаточной функции.

Для определения процесса в замкнутой импульсной системе при произвольном воздействии подставим (3.41) в (3.38). Тогда после очевидных преобразований получим

$$z(mT) = \sum_{v=1}^n \frac{H^*(p_v)}{\dot{G}^*(p_v)} e^{p_v m T} \sum_{s=0}^m e^{-p_v(s+1)T} f(sT). \quad (3.42)$$

Эта формула для конкретных выражений $f(mT)$ позволяет определить процесс $z(mT)$ в замкнутой форме.

3.5. Процессы в импульсных системах

Процессы в замкнутых импульсных системах определяются выражениями (3.37), (3.38), (3.42). Последние выражения описывают

процесс, возникающий в замкнутой импульсной системе при приложении внешнего воздействия в момент $t=0$. Если же внешнее воздействие $f(mT)$ будет приложено в произвольный момент времени, например $t=m_0$, то вместо

$$z(mT) = \sum_{s=0}^m k((m-s)T)f(sT). \quad (3.43)$$

будем иметь $z(mT) = \sum_{s=m_0}^m k((m-s)T)f(sT)$, $m \geq m_0$.

Пусть $m_0 = -\infty$. Это соответствует тому, что между моментом приложения внешнего воздействия $t_0 = -\infty$ и моментом наблюдения процесса t прошло бесконечно большое время. Такой процесс естественно назвать *вынужденным*. Обозначим его через $z^B(mT)$. Тогда $z^B(mT) = \sum_{s=-\infty}^m k((m-s)T)f(sT)$ или, после замены переменной $m-s$ на s и, значит, s на $m-s$ и соответствующего изменения пределов суммирования $-\infty$ и m на ∞ и 0 , получим выражение для вынужденного процесса

$$z^B(mT) = \sum_{s=0}^{\infty} k(sT)f((m-s)T). \quad (3.44)$$

Разность между общим процессом $z(mT)$ (3.38) и вынужденным процессом $z^B(mT)$ называется *свободным* процессом $z^C(mT)$:

$$z^C(mT) = z(mT) - z^B(mT).$$

В силу (3.38)

$$z^C(mT) = \sum_{s=m+1}^{\infty} k(sT)f((m-s)T).$$

Свободный процесс определяет отклонение общего процесса в нелинейной системе от вынужденного процесса.

Вынужденный процесс в импульсных системах определяется выражением (3.44). Для получения общей формулы вынужденных процессов воспользуемся разложением внешнего воздействия в ряд Тейлора

$$f((m-s)T) = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{(sT)^k}{k!} f^{(k)}(mT), \quad (3.45)$$

где $f^{(k)}(mT) = \left[\frac{d^k f(t)}{dt^k} \right]_{t=mT}$ - производные внешнего воздействия в дискретных точках $t=mT$. Подставляя (3.45) в (3.44) и изменяя очередность суммирования, получим

$$z^B(mT) = \sum_{k=0}^{\infty} \left\{ \sum_{s=0}^{\infty} k(sT)(sT)^k \right\} (-1)^k \frac{f^{(k)}((m-s)T)}{k!}. \quad (3.46)$$

Величины

$$d(k) = (-1)^k \sum_{s=0}^{\infty} k(sT)(sT)^k, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (3.47)$$

представляют собой *моменты* k -го порядка решетчатой временной характеристики $k(mT)$. Принимая во внимание (3.47), запишем (3.46) окончательно в виде

$$z^B(mT) = \sum_{k=0}^{\infty} d(k) \frac{f^{(k)}((m-s)T)}{k!}. \quad (3.48)$$

Таким образом, вынужденный процесс в импульсной системе полностью определяется моментами решетчатой временной характеристики и производными внешнего воздействия в дискретных точках. Моменты $d(k)$ можно определить и по передаточной функции замкнутой импульсной системы $K^*(p)$. Для этой цели воспользуемся определением Z -преобразования

$$K^*(p) = \sum_{s=0}^{\infty} e^{-psT} k(sT). \quad (3.49)$$

Дифференцируя k раз обе части (3.49) по p , получим

$$\frac{d^k K^*(p)}{dp^k} = (-1)^k \sum_{s=0}^{\infty} (sT)^k k(sT),$$

откуда при $p=0$ будем иметь

$$d(k) = (-1)^k \sum_{s=0}^{\infty} (sT)^k k(sT) = \left[\frac{d^k K^*(p)}{dp^k} \right]_{p=0}. \quad (3.50)$$

Это значит, что момент $d(k)$ равен k -й передаточной функции импульсной системы $K^*(p)$ по p при $p=0$.

Вынужденные процессы при монотонных воздействиях

Рассмотрим вынужденные процессы при монотонных воздействиях: постоянном, линейном и степенном.

1. *Постоянное воздействие:* $f(t) = A$, $t \geq 0$.

В этом случае $f^{(k)}(t) \equiv 0$, $k \geq 1$, и, значит, при $t=mT$

$$f(mT) = A, \quad f^{(k)}(mT) \equiv 0, \quad k > 0.$$

Из выражения вынужденного процесса (3.48) следует

$$z^B(mT) = d(0)A. \quad \text{Но согласно (3.50) } d(0) = \sum_{s=0}^{\infty} k(sT) = K^*(0). \quad \text{Поэтому}$$

$$z^B(mT) = K^*(0)A.$$

Вынужденный процесс при постоянном воздействии также постоянен и его отношение к величине внешнего воздействия равно значению передаточной функции замкнутой системы $K^*(p)$ при $p=0$.

2. *Линейное воздействие:* $f(t) = At$.

В этом случае $f^{(1)}(t) = A$, $f^{(k)}(t) \equiv 0$, $k \geq 2$, и, значит, при $t=mT$ $f(mT) = AmT$, $f^{(1)}(mT) = A$, $f^{(k)}(mT) \equiv 0$, $k \geq 2$. Из выражения вынужденного процесса (3.48) при учете получаем

$$z^B(mT) = d(0)ATm + d(1)A, \text{ где } d(0) = \sum_{s=0}^{\infty} k(sT)(sT) = K^*(0),$$

$$d(1) = - \sum_{s=0}^{\infty} k(sT)(sT) = \left[\frac{dK^*(p)}{dp} \right]_{p=0}.$$

Следовательно, вынужденный процесс при линейном воздействии также линеен, но с угловым коэффициентом, равным значению передаточной функции замкнутой системы $K^*(p)$ при $p=0$, и свободным членом, равным значению производной по p передаточной функции при $p=0$.

3. *Степенное воздействие:* $f(t) = At^l$,

$$f^{(k)}(t) = A \frac{l!}{(l-k)!} t^{l-k}, \quad k = 1, 2, \dots, l-1, \quad f^{(l)}(t) = Al!, \quad f^{(l+v)}(t) \equiv 0, \quad v \geq 1, \text{ и, значит,}$$

$$\text{при } t=mT \quad f(mT) = AT^l m^l, \quad f^{(k)}(mT) = A \frac{l!}{(l-k)!} T^{l-k} m^{l-k},$$

$$f^{(l)}(mT) = Al!, \quad f^{(l+v)}(mT) \equiv 0, \quad v \geq 1.$$

Из выражения вынужденного процесса (3.48) получаем

$$z^B(mT) = d(0)AT^l m^l + \sum_{k=1}^l d(k)A \frac{l!}{(l-k)!} T^{l-k} m^{l-k},$$

или, учитывая (3.50), имеем

$$z^B(mT) = A \left\{ K^*(0)T^l m^l + \sum_{k=1}^l \left[\frac{d^k K^*(p)}{dp^k} \right]_{p=0} \frac{l!}{(l-k)!} T^{l-k} m^{l-k} \right\}. \quad (3.51)$$

Вынужденный процесс при степенном воздействии степени l представляет собой полином той же степени l , но с иными коэффициентами.

Легко видеть, что при $l=0, 1$ из (3.51) следуют выражения вынужденного процесса при постоянном и линейном воздействиях. Вынужденный процесс при полиномиальном воздействии находится как линейная комбинация вынужденных процессов при степенных воздействиях.

Условия нулевой вынужденной ошибки

Подставим $z^B(mT)$ из (3.48) в выражение вынужденной ошибки

$x^B(mT) = f(mT) - z^B(mT)$. Тогда, обозначая

$$c(0) = 1 - d(0) = 1 - K^*(0); \quad c(s) = -d(s) = -\frac{d^s}{dp^s} \left[1 - K^*(p) \right]_{p=0}, \text{ запишем вы-}$$

ражение вынужденной ошибки в виде

$$x^B(mT) = c(0)f(mT) + \sum_{s=1}^{\infty} c(s) \frac{f^{(s)}(mT)}{s!}. \quad (3.52)$$

Коэффициенты $c(0), \dots, c(s), \dots$ называют *коэффициентами ошибок*.

Рассмотрим вначале постоянное воздействие. В этом случае из (3.52) получаем

$$x^B(mT) = x^B = c(0)A = \left[1 - K^*(0) \right] A.$$

Вынужденная ошибка будет равна нулю, $x^B = 0$, при условии

$$1 - K^*(0) = 0, \text{ или поскольку } K^*(0) = \frac{1}{1 + W_K^*(0) W^*(0)} = 0, \text{ то}$$

$$1 - K^*(0) = \frac{1}{1 + W_K^*(0) W^*(0)} = 0. \quad (3.53)$$

Но это условие совпадает с условием нулевой ошибки, если в последнем принять $p=0$. Таким образом, условие нулевой вынужденной ошибки при постоянном воздействии является частным случаем условия идеальной системы с нулевой ошибкой при $p=0$.

Естественно, условия нулевой вынужденной ошибки (3.53) значительно менее стеснительны, чем условия идеальной системы с нулевой ошибкой, и если последние условия часто принципиально невозможно осуществить, то условия (3.53), как правило, легко осуществимы. Так, эти условия выполняются, если $W_K^*(0) W^*(0) = \infty$, т. е. если передаточная функция разомкнутой системы имеет, например, индекс нейтральности, равный 1, или если выражение представимо в виде $W_K^*(p) W^*(p) = \frac{1}{e^{pT} - 1} W_1^*(p)$.

Это имеет место, если непрерывная часть содержит интеграторы, либо ЦВУ содержит диграторы, т. е. если разомкнутая система содержит запоминающие элементы. Для степенного или, в общем случае, полиномиального воздействия степени l :

$$x^B(mT) = c(0)f(mT) + \sum_{k=1}^l c(k) \frac{f^{(k)}(mT)}{k!} \text{ вынужденная ошибка будет равна}$$

нулю, $x^B(mT) \equiv 0$, при условиях

$$c(0) = 1 - K^*(0) = 0, \quad c(m) = \frac{d^m}{dp^m} [1 - K^*(p)] \Big|_{p=0}, \quad m = 1, \dots, l.$$

Первое из этих условий совпадает с (3.53). Все эти условия будут выполнены, если индекс нейтральности передаточной функции разомкнутой системы $W_k^*(p)W^*(p)$ равен l . При $l=1$ мы приходим к ранее рассмотренному частному случаю. Очевидно, что увеличение индекса нейтральности не меняет вывода о нулевой вынужденной ошибке. Таким образом, *средство достижения нулевой вынужденной ошибки при полиномиальном внешнем воздействии состоит в использовании или введении в систему надлежащего числа интеграторов или диграторов.*

3. Гармоническое воздействие. При гармонических внешних воздействиях число слагаемых в общей формуле вынужденного процесса бесконечно велико, и для получения явных формул приходится прибегать к суммированию бесконечных рядов. Хотя это в общем и не сложная операция, для определения вынужденного процесса при гармоническом воздействии есть более простой путь. Запишем решетчатое гармоническое воздействие в комплексной форме: $\vec{f}(mT) = Be^{j(\omega mT + \varphi)}$, где B - амплитуда, φ - угловая частота, или начальная фаза. Подставляя его в уравнение вынужденного процесса (3.38), получим выражение для вынужденного процесса также в комплексной форме:

$$\vec{z}^B(mT) = \sum_{s=0}^{\infty} k(sT) B e^{j(\omega(m-s)T + \varphi)}.$$

или, после очевидных преобразований,

$$\vec{z}^B(mT) = \left[\sum_{s=0}^{\infty} k(sT) e^{-j\omega sT} \right] B e^{j(\omega mT + \varphi)}.$$

Полагая в выражении (3.49), определяющем связь между передаточной функцией и временной характеристикой, $p = j\omega$, получим

$$K^*(j\omega) = \sum_{m=0}^{\infty} k(mT) e^{-j\omega mT}.$$

И значит, принимая во внимание (3.51), запишем выражение для $z^B(mT)$ окончательно в такой форме: $\vec{z}^B(mT) = K^*(j\omega) \vec{f}(mT)$.

Величина $K^*(j\omega)$ показывает характер преобразования гармонического воздействия $\vec{f}(mT)$ замкнутой импульсной системой. Она на-

зывается *частотной характеристикой* замкнутой импульсной системы.

3.6. Основные характеристики замкнутой импульсной системы

Основными характеристиками замкнутой импульсной системы являются: передаточная функция $K^*(p)$, временная характеристика $k(mT)$, частотная характеристика $K^*(j\omega)$. Каждая из этих характеристик однозначно определяет свойства замкнутой импульсной системы.

Первая характеристика – *передаточная функция представляет собой сокращенную запись уравнений, описывающих состояния импульсной системы в дискретные моменты времени.* В отличие от непрерывных систем, эти уравнения не дифференциальные, а разностные. Само по себе составление разностных уравнений импульсной системы по дифференциальным уравнениям её приведенной непрерывной части представляет собой весьма громоздкую процедуру. Эту процедуру удалось избежать благодаря установлению связи между передаточными функциями разомкнутой импульсной системы $W^*(p)$ и её приведённой непрерывной части $W(p)$.

Вторая характеристика – *временная характеристика определяет временные свойства импульсной системы, а третья характеристика – частотная характеристика - частотные свойства системы.*

Все эти характеристики тесно связаны друг с другом. Особенно проста связь между частотной характеристикой и передаточной функцией: $K^*(j\omega) = [K^*(p)]_{p=j\omega}$. Частотная характеристика $K^*(j\omega)$ определяется частным значением аргумента p передаточной функции $K^*(p)$, расположенном на отрезке $-\frac{\omega_0}{2} < \omega \leq \frac{\omega_0}{2}$ мнимой оси комплексной плоскости (рис.3.7). Связь передаточной функции $K(p)$ с временной характеристикой $k(mT)$ определяется дискретным преобразованием Лапласа, а связь частотной характеристики $K^*(j\omega)$ с временной характеристикой – дискретным преобразованием Фурье, получаемым при $p = j\omega$. Связь временной характеристики с частотной характеристикой даётся обратным преобразованием Фурье, которое имеет вид

$$k(mT) = \frac{1}{\omega_0} \int_{-\omega_0/2}^{\omega_0/2} K^*(j\omega) e^{j\omega mT} d\omega.$$

Тема 4. Информационно-измерительная система - как измерительно-преобразовательный элемент САУ

При определении текущего состояния ОАУ (идентификации) стремятся получить наиболее полную информацию об управляемом объекте, поэтому одновременно проводят измерения многих (часто разнородных) физических величин, характеризующих этот объект. Результатом выполняемых измерений являются не только отдельные числа, соответствующие истинным значениям параметров объекта, но и большие массивы числовых данных, которые составляют поток измерительной информации на выходе средств измерений (измерительно-преобразовательного элемента).

Для удобства обработки разнородных информационных потоков о контролируемом объекте целесообразно применять многофункциональные и многоканальные измерительные устройства, которые обеспечивают преобразование разнородных физических величин (чаще всего эти величины преобразуются в электрический сигнал), обработку полученной измерительной информации и её предоставление в виде, удобном для дальнейшего использования человеком или электронно-вычислительными машинами. Такие устройства принято называть информационно-измерительными системами (ИИС).

Таким образом, под ИИС понимается совокупность технических средств измерений, объединённых единством задач и общим алгоритмом функционирования, характеризующаяся нормированными метрологическими характеристиками и предназначенная для автоматического или автоматизированного восприятия информации, выраженной различными физическими величинами непосредственно от объекта, её преобразования, измерения, обработки, хранения и представления в форме, доступной для восприятия человеком или автоматическими решающими устройствами (например, ЭВМ). ИИС, как правило, состоит из ряда взаимосвязанных функционально самостоятельных подсистем (измерительных каналов, блоков).

Поскольку информация, выдаваемая ИИС, может состоять из результатов как прямых, так и косвенных или совокупных измерений, то ИИС должна включать в себя вычислительные блоки для получения обобщенных результатов прямых измерений ряда величин.

Многообразие целей и условий проведения эксперимента и управления объектом, требований к результатам измерений и методам их обработки влечёт за собой огромное число структур ИИС. Поэтому наиболее рациональным методом проектирования ИИС является агрегатно-блочное построение требуемой структуры из ограниченного на-

бора унифицированных функциональных блоков, имеющих определенным образом выбранные и сформированные метрологические, эксплуатационные, конструктивные и другие характеристики, обеспечивающие возможность их совместной работы в системе. Основой унификации блоков ИИС является представление об измерении любой физической величины, как совокупности ряда последовательных измерительных преобразований.

В настоящее время не существует общепринятой полной квалификации ИИС. ИИС является ядром большинства систем: автоматического управления, регулирования, контроля, технической диагностики и прогнозирования (экспертизы) и др.

Цель измерительных систем – получение измерительной информации об объекте. Полученная системой информация замыкается на человека, проводящего эксперимент или управление, а также представляется в виде, удобном для ввода в ЭВМ. Для ИИС характерны более высокие по отношению к системам другого вида метрологические характеристики, более широкая номенклатура и количество измеряемых физических величин (до тысяч измеряемых точек) и, как следствие, большие потоки информации на их выходе. Ввиду того, что основной массив информации с выхода измерительных систем передается человеку, им присуща развитость средств представления информации. Поэтому определяющим зачастую является требование неискажённого, наглядного и оперативного представления текущей информации с учётом динамики её обновления и быстрого действия системы, обеспечивающего удобство восприятия и анализа, необходимых для принятия решения об изменении условий проведения эксперимента, его продолжении или прекращении. Эти требования сохраняются и тогда, когда анализ результатов эксперимента выполняется человеком на основе не текущих (оперативных), а накопленных данных.

Важной особенностью измерительных систем, обладающих сочетанием высокого быстродействия и точности, применяемых при управлении сложными объектами или при выполнении многофакторных экспериментов, являются большие потоки информации, значительная часть которой является избыточной. Сокращение избыточности информации, без нарушения достоверности и достаточности остальной её части, представляет собой сложную задачу, для решения которой требуются специальные меры при обработке измерительной информации.

Измерительные системы в свою очередь подразделяются на системы, предназначенные: для измерения величин в дискретных

точках, распределенных в пространстве; для измерения обобщенных характеристик исследуемых величин (среди них наибольшее значение имеют статистические, позволяющие получить законы распределения вероятностей, корреляционные, спектральные и прочие характеристики случайных процессов); для раздельного измерения параметров взаимосвязанных величин.

Такие ИИС позволяют составлять и решать системы уравнений, устанавливающих связь между непосредственно измеряемыми и косвенно определяемыми параметрами, решать задачи идентификации динамических объектов в технике управления.

Системы автоматического контроля предназначены обычно для контроля объектов (технологических процессов) с известной моделью, параметры которой полностью определены. Получаемая в процессе контроля информация должна быть минимальной, позволяющей оценить, находится ли данный объект в заданном режиме или этот режим нарушен. Количественная информация об исправной работе объекта имеет малую ценность для оператора. В САК рассматриваются качественно отличные состояния объекта, число которых сведено к минимуму. Для таких систем свойственна высокая степень обратной связи, используемой для целей управления объектом. Системам этого вида присущи значительно более высокие эксплуатационные параметры (длительность непрерывной работы, устойчивость к воздействию промышленных помех, климатическим и механическим воздействиям.).

Системы технической диагностики (экспертные) обязательно предполагают выполнение измерительных преобразований, совокупность которых представляет базу для логической процедуры диагноза. Наиболее часто интересуются не состоянием диагностируемого объекта в целом, а состоянием отдельных элементов его структуры. Цель диагностики состоит в распознавании класса состояний, к которому принадлежит состояние обследуемого технического средства. Системы технической диагностики по своей структуре и набору применяемых устройств во многом близки системам автоматического контроля. Однако набор средств обработки, анализа и представления информации, входящих в состав структуры систем технической диагностики, может оказаться, более развитым, чем в системах двух других рассматриваемых видов.

Системы распознавания образов должны определять состояние, в котором находится объект, при этом количество вариантов объединения признаков, по которым определяется состояние объекта может быть настолько большим, что учесть их затруднительно. В этом слу-

чае применяются обучаемые распознающие системы. Эти системы перед вводом в эксплуатацию подвергаются настройке (обучению) по конкретным совокупностям входных сигналов, после чего они автоматически распознают состояния управляемого объекта.

Многоплановость и практически неограниченный диапазон задач, решаемых с применением ИИС, вызывает появление такого же многообразия моделей систем, выполняемых этими моделями функций и, следовательно, высокую их стоимость по сравнению с другими техническими средствами.

Принципиально возможен и другой подход к созданию систем, связанный с применением ограниченного числа универсальных моделей систем. Однако в этом случае структурная и функциональная избыточность каждой подобной системы, являющаяся следствием ее универсальности, приводит не только к дальнейшему росту сложности модели и её стоимости, но и ещё к большему увеличению продолжительности создания системы.

При создании ИИС применяется принцип агрегатирования, который основан на использовании функционально и конструктивно завершённых технических средств, характеризующихся метрологической, информационной, конструктивной и эксплуатационной совместимостью при их совместном применении в различных сочетаниях.

В соответствии со схемой процесса извлечения информации при измерениях (рис. 4.1) информационную и структурную модели (схемы) гипотетической ИИС можно представить в наиболее общем виде, показанном на рис. 4.2, 4.3.

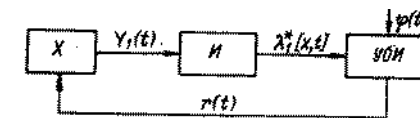


Рис. 4.1. Схема получения и использования измерительной информации: X – исследуемый объект; $И$ – измерительное устройство; $УОИ$ – устройство обработки информации

Информационная модель ИИС - есть описание информационных потоков (сообщений, команд, данных и др.), и их преобразований в системе, а структурная – описание состава ИИС и связей функциональных узлов (модулей, блоков и др.)

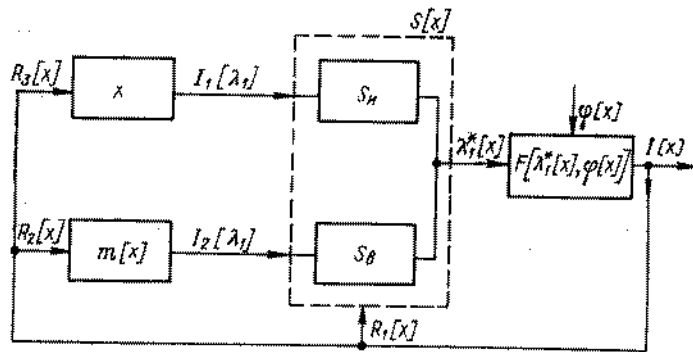


Рис. 4.2. Информационная модель системы

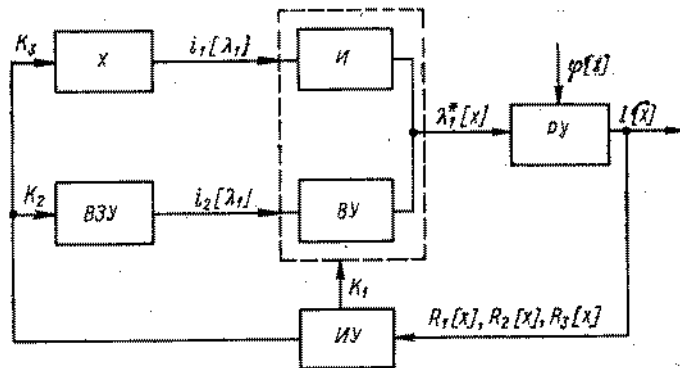


Рис. 4.3. Структурная модель системы

Обозначения на рис. 4.2 и 4.3: $m[x]$ – математическая модель объекта X ; $I_1[\lambda_1]$, $I_2[\lambda_1]$ – потоки информации о характеристике $\lambda_1[x]$; S_u – оператор измерения значений характеристики $\lambda_1[x]$; S_θ – оператор вычисления значений характеристики $\lambda_1[x]$; $\varphi[x]$ – поток информации об объекте, поступающий непосредственно в устройство, формирующее суждение или решение $I[x]$; $F[\lambda_1^*[x], \varphi[x]]$ – оператор формирования суждения или решения; $R_1[x]$, $R_2[x]$, $R_3[x]$ – команды, формируемые на основе выработанного суждения или решения для управления объектом X , моделью $m[x]$ и процедурой оценивания $S[x]$; $BЗУ$ – внешнее запоминающее устройство, хранящее данные о математиче-

ской модели $m[x]$; I – измерительное устройство, реализующее процедуру S_u ; BV – вычислительное устройство, реализующее процедуру S_θ ; PV – решающее устройство, реализующее процедуру $F[\lambda_1^*[x], \varphi[x]]$; $IУ$ – исполнительное устройство, обрабатывающее команды $R_1[x]$, $R_2[x]$, $R_3[x]$; $i_1[\lambda_1]$, $i_2[\lambda_1]$ – процессы или последовательности, являющиеся носителями потоков информации- $I_1[\lambda_1]$, $I_2[\lambda_1]$; K_1 , K_2 , K_3 – управляющие воздействия, обрабатывающие команды $R_1[x]$, $R_2[x]$, $R_3[x]$ соответственно.

ИИС в отличие от измерительного прибора характеризуется рядом признаков, основные из которых следующие: многофункциональность (многоканальность); сложный характер взаимодействия составных частей; наличие блоков (каналов), обладающих всеми признаками самостоятельного измерительного устройства. Измерительная часть структурной модели информационной системы в общем случае связана с остальными подсистемами 3 каналами: поступления входного потока информации, носителем которого является $i_1[\lambda_1]$; выдачи данных о результатах измерений, по которому следует поток информации $\lambda_1^*[x]$; поступления команд R .

Информационная и структурная модели измерительной части ИИС (рис.4.4-4.5) содержат составляющие: S_1 – оператор преобразования входного потока информации $I_1[\lambda_1]$ в поток $I'_1[\lambda_1]$, из которого извлекаются данные о значениях некоторой многомерной характеристики $\delta_1[x]$ объекта X , которая функционально связана с характеристикой $\lambda_1[x]$ (при прямых измерениях $\delta_1[x] = \lambda_1[x]$); S_2 – оператор сравнения измеряемых величин с образцовыми; S_3 – оператор преобразования количественных данных о значениях $\delta_1^*[x]$ в количественные данные о значениях $\lambda_1^*[x]$, т.е. имеется следующая последовательность преобразований: $S_1[I_1[\lambda_1]] = I'_1[\lambda_1]$, $S_2[I'_1[\lambda_1]] = \delta_1^*[x]$, $S_3[\delta_1^*[x]] = \lambda_1^*[x]$; R'_1 , R''_1 , R'''_1 – потоки управляющих команд, относящихся к операторам S_1 , S_2 , S_3 соответственно; Π_1 – преобразователь электрического процесса $i_1[\lambda_1]$ в процесс $i'_1[\lambda_1]$, т.е. реализующий оператор S_1 ; M – образцовая мера; K – компаратор (M и K реализуют оператор S_2); Π_2 – преобразователь количественных данных $\delta_1^*[x]$ в количественные данные о значениях $\lambda_1^*[x]$; $BПИ$ – устройство (блок) представления измерительной информации; $i_3[\lambda_1^*]$ – процесс, являющийся носителем количественных данных (индикация, запись, код и т. д.) – устройства Π_2 и $BПИ$ реализуют оператор S_3 .

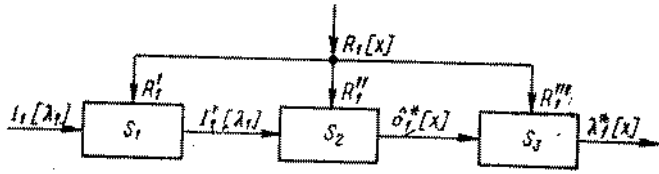


Рис. 4.4. Информационная модель измерительной части ИИС

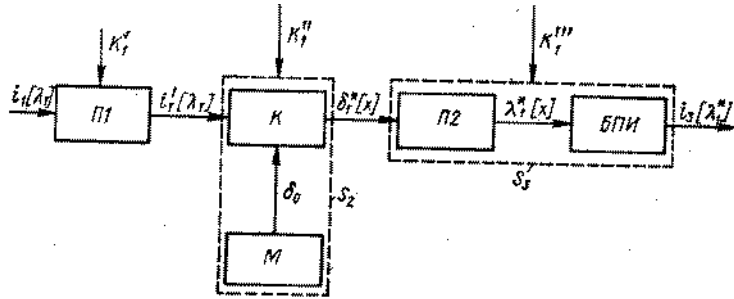


Рис. 4.5. Структурная модель измерительной части ИИС

Содержание задач, решаемых при проектировании ИИС на принципах агрегатирования (унификации), показано на рис. 4.6. В наиболее общем виде информационную и структурную модели, которые более подробно описывают модели рис.4.2-4.5, можно представить в виде схем (рис.4.7-4.8). Основные функции средств, образующих систему, и соответствующие этим функциям операторы приведены в таблице 4.1.

На этих рисунках и в табл.4.1 обозначено: $S_X[\lambda]$ - поток информации о характеристике объекта $\lambda[x]$, поступающий в систему непосредственно от объекта X ; $P_{сб}[S_X[\lambda]]$ - оператор сбора информации о характеристике объекта эксперимента $\lambda[X]$ и получения потока информации $S_{сб}[\lambda]$: $S_{сб}[\lambda] = P_{сб}[S_X[\lambda]$; $P_{np}[S_{сб}[\lambda]]$ - оператор преобразования потока информации $S_{сб}[\lambda]$ в поток $S_{np}[\lambda]$: $S_{np}[\lambda] = P_{np}[S_{сб}[\lambda]]$; $P_{a-ц}[S_{np}[\lambda]]$ - оператор аналого-цифрового преобразования характеристики $\lambda[X]$, обеспечивающий получение кодовых эквивалентов её количественного значения – оценки $\lambda_k^*[X]$, необходимых для ввода в цифровые устройства представления и обра-

ботки информации: $\lambda_k^*[X] = P_{a-ц}[S_{np}[\lambda]]$; $P_{И}[S_{np}[\lambda]]$ - оператор измерения характеристики $\lambda[X]$, обеспечивающий получение её количественного значения – оценки $\lambda_{И}^*[x]$ в форме, доступной для её непосредственного восприятия человеком: $\lambda_{И}^*[x] = P_{И}[S_{np}[\lambda]]$; $M[x]$ – математическая модель объекта X , являющаяся источником $S_M[x]$ априорного потока информации о характеристиках этой модели объекта X ; $P_3[S_M[x]]$ - оператор хранения информации о характеристиках математической модели объекта, необходимых в качестве дополнительной априорной информации об объекте для реализации оператора обработки и формирования потока информации $S_3[x]$: $S_3[x] = P_3[S_M[x]]$; $P_{об}[\lambda_k^*[x], S_3[x]]$ - оператор вычислительной обработки оценки $\lambda_k^*[x]$, полученной как результат аналого-цифрового преобразования с учетом данных, содержащихся в потоке информации $S_3[x]$, и определения обобщенной оценки $\lambda_{об}^*[x] = P_{об}[\lambda_k^*[x], S_3[x]]$; $P_{П}[\lambda_k^*[x], \lambda_{об}^*[x]]$ - оператор представления информации, содержащей оценки $\lambda_k^*[x]$, $\lambda_{об}^*[x]$, в виде некоторого потока информации $S_0[\lambda]$, необходимой человеку-оператору для формирования суждения о поведении объекта и решения о стратегии дальнейшего проведения измерений: $S_0[\lambda] = P_{П}[\lambda_k^*[x], \lambda_{об}^*[x]]$.

Кроме того, на рис.4.7-4.8 обозначено: $S_M(Y)$ - поток информации о характеристиках управления математической моделью $M[Y]$ информационно-измерительной системы Y (об алгоритме её функционирования); $P_Y[S_M[Y]]$ - оператор формирования массива служебной информации $S_Y[Y]$, обеспечивающего эффективную организацию совместного функционирования элементов системы; $S_Y[Y] = P_Y[S_M[Y]]$; $P_B[\lambda_{об}^*[x]]$ - оператор формирования воздействий $S_B[x]$ на объект X : $S_B[x] = P_B[\lambda_{об}^*[x]]$. Рассмотренная структурная модель справедлива для ИИС, работающих в реальном масштабе времени, когда обработка измерительной информации, представление результатов измерительных преобразований информации, обработка и формирование воздействий на объект осуществляются в ритме технологического процесса или эксперимента (измерений).

Таблица 4.1

Группа средств ИИС	Основные функции, выполняемые средствами системы	Потоки информации, последовательность и операторы преобразования	Примечание
Сбора информации	Непосредственное восприятие информации от объекта исследования (контроля, диагностики), в частности с применением методов сканирования, коммутация и передача по линиям связи к последующим элементам структуры	$S_x[\lambda] \rightarrow P_{об} \{S_x[\lambda]\} = S_{об}[\lambda]$	
Преобразования информации	Преобразование различных физических величин, характеризующих состояние объекта, в электрические неунифицированные (естественные) или унифицированные сигналы	$S_{об}[\lambda] \rightarrow P_{пр.н} \{S_{об}[\lambda]\} = S_{пр.н}[\lambda]$ или $S_{об}[\lambda] \rightarrow P_{пр.н} \{S_{об}[\lambda]\} = S_{пр.н}[\lambda]$	$S_{пр}[\lambda]$ — один из потоков информации, $S_{пр.н}[\lambda]$, $S_{пр.н}[\lambda]$ или $S_{пр.н}[\lambda]$
	Преобразование электрических унифицированных сигналов одного вида в другой	$S_{пр.н}[\lambda] \rightarrow P_{пр.а} \{S_{пр.н}[\lambda]\} = S_{пр.а}[\lambda]$	
Измерения	Аналого-цифровое преобразование сигналов, несущих информацию о характеристике объекта, в кодовые эквиваленты ее оценки	$S_{пр}[\lambda] \rightarrow P_{пр.к} \{S_{пр}[\lambda]\} = \lambda_k^*[x]$	$S_{пр}[\lambda]$ — один из потоков информации, $S_{пр.н}[\lambda]$, $S_{пр.н}[\lambda]$ или $S_{пр.н}[\lambda]$
	Получение количественных значений (оценки) характеристик об объекте в форме, доступной для непосредственного восприятия человеком-оператором	$S_{пр}[\lambda] \rightarrow P_{пр} \{S_{пр}[\lambda]\} = \lambda_n^*[x]$	$S_{пр}[\lambda]$ — один из потоков информации, $S_{пр.н}[\lambda]$, $S_{пр.н}[\lambda]$ или $S_{пр.н}[\lambda]$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ТАБЛ. 4.1

Группа средств ИИС	Основные функции, выполняемые средствами системы	Потоки информации, последовательность и операторы преобразования	Примечание
Представления информации	Представление информации, полученной в результате аналого-цифрового преобразования и (или) вычислительной обработки, в форме, доступной для непосредственного восприятия человеком-оператором	$\lambda_k^*[x], \lambda_{об}^*[x] \rightarrow P_{пр} \{ \lambda_k^*[x], \lambda_{об}^*[x] \} = S_{об}[\lambda]$	
Хранения информации	Хранение априорной информации об объекте, необходимой для выполнения операций, связанных с вычислительной обработкой результатов аналого-цифрового преобразования	$S_{об}[\lambda] \rightarrow P_{з} \{S_{об}[\lambda]\} = S_{з}[\lambda]$	
Обработки информации	Обработка результатов преобразованных измерительных преобразований	$\lambda_k^*[x], \lambda_{об}^*[x] \rightarrow P_{об} \{ \lambda_k^*[x], S_{з}[\lambda] \} = \lambda_{об}^*[x]$	
Формирования или воздействия	Автоматическое создание дополнительных условий проведения эксперимента над объектом (его контроля, диагностики) на основе данных обработки информации об объекте	$\lambda_{об}^*[x] \rightarrow P_{в} \{ \lambda_{об}^*[x] \} = S_{в}[\lambda]$	
Управления системой	Организация совместного функционирования средств, образующих систему, в соответствии с заданной программой	$S_{в}[\lambda] \rightarrow P_{у} \{S_{в}[\lambda]\} = S_{у}[\lambda]$	

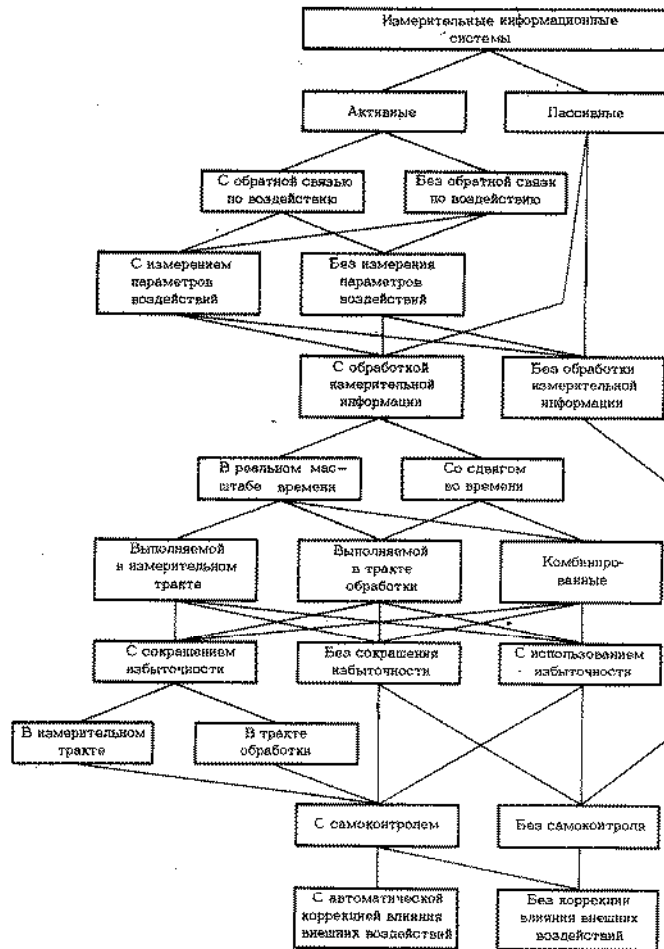


Рис. 4.9. Классификационная схема ИИС

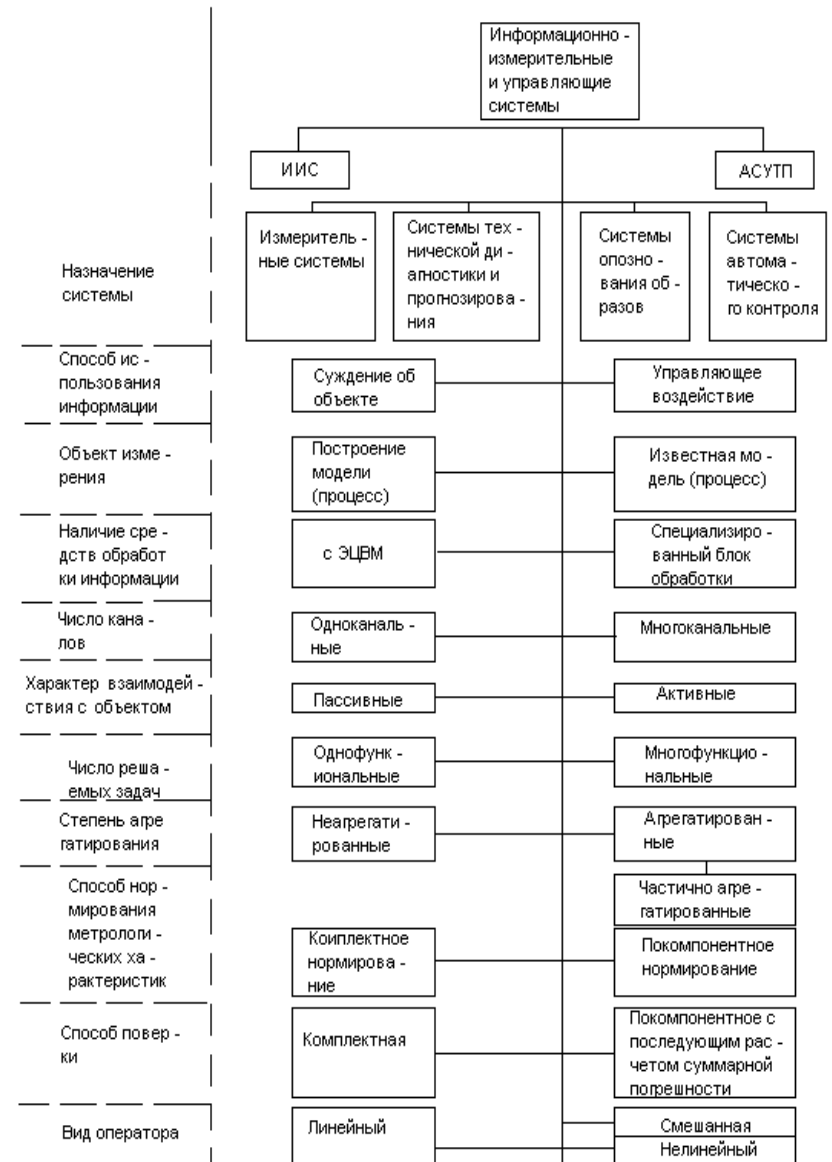


Рис. 4.10. Обобщенная классификационная схема ИИС

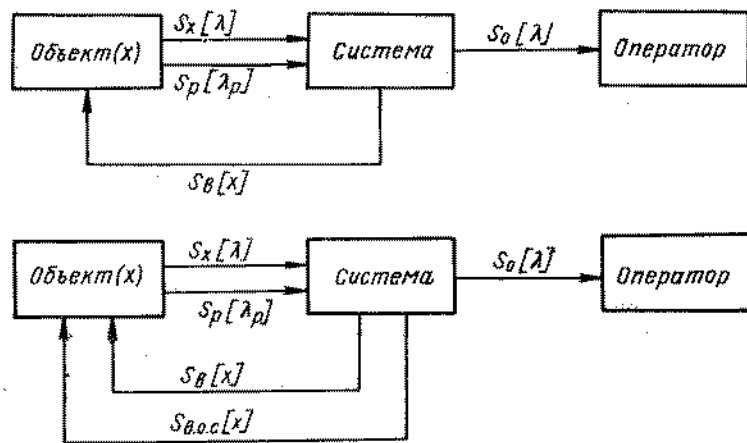


Рис.4.11. Схемы распределения воздействия и потоков информации в активных ИИС: а – без обратной связи (ОС) по воздействию; б – с обратной связью по воздействию ($S_x[\lambda]$ – поток информации, воспринимаемый от ОАУ и содержащий сведения о его характеристике $\lambda[X]$; $S_p[\lambda_p]$ – поток информации, отражающий реакцию ОАУ на воздействие и содержащий данные о характеристике $\lambda_p[X]$; $S_0[x]$ – автоматическое воздействие на объект, обеспечивающее проведение измерений в ИИС без ОС; $S_{в.о.с}[x]$ – автоматическое воздействие на объект, формируемое ИИС с ОС; $S_0[\lambda]$ – поток информации, несущий сведения о характеристиках $\lambda[X]$, $\lambda_p[X]$ и их оценках $\lambda^*[X]$, $\lambda_p^*[X]$, необходимых оператору для принятия решения о поведении ОАУ

В отличие от обобщенной структурной схемы ИИС, работающих в реальном масштабе времени (рис. 4.12), для данных ИИС распределение потоков информации, последовательность их преобразований и реализуемые различными элементами структур операторы (табл. 4.1) несколько иные. В первом варианте (а) в ритме измерительных преобразований ведётся лишь накопление информации в виде её оценок $\lambda[X]$ и представление той ее части (на схеме показана штрихами), которая не требует предварительной обработки.

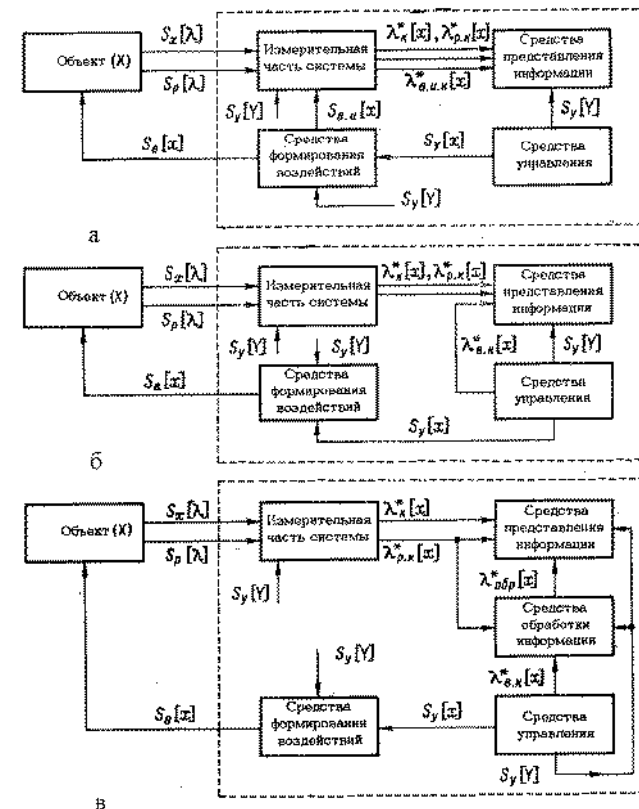


Рис. 4.12. Структурные схемы активных систем: а – с каналом измерения воздействий; б – без канала измерения воздействий; в – комбинированного типа (с индексом "и" – соответствующие величины после измерительного преобразования, с индексом "к" – кодовые эквиваленты соответствующих величин, S_y – формируемые средством управления потоки информации, обеспечивающие организацию совместного функционирования элементов ИИС

Со сдвигом во времени обработке подвергается накопленная информация $\lambda_3[X]$ и в виде оценок $\lambda_{об}[X]$ передаётся на средства представления. Возможен также одновременно с обработкой $\lambda_3[X]$ ввод её части в средства представления информации (на рис.4.13. с индексом «з» - хранимые величины, с индексом «об» - обработанные величины, с индексом «сб»- величины, отражающие сбор информации, с индексом «н» - накопленные величины).

В варианте (б) весь поток информации $S_{сб}[\lambda]$, полученный с помощью средств сбора, накапливается в ритме сбора в средствах хранения. Со сдвигом во времени осуществляется вывод потока $S_{зсб}[X]$ и представление человеку-оператору потока $S_0[X]$. Одновременно с обработкой часть информации может быть непосредственно передана в средства представления (штриховые линии на схеме). Этот вариант получил распространение в тех случаях, когда по ряду причин (ограничения по объему и массе аппаратуры, времени выполнения различного рода преобразований) накопление информации наиболее рационально вести непосредственно после её сбора в аналоговой форме с последующим преобразованием со сдвигом во времени уже без необходимости учёта указанных ограничений, например, преобразованием в цифровую форму. Подобного рода преобразования могут быть связаны также с необходимостью трансформации спектра предварительно записанных кратковременных сигналов (процессов) из одной области в другую с целью их тщательного анализа.

Вариант (в) по аналогичным для варианта (б) причинам предусматривает 2 этапа (и вида) преобразования информации. Наиболее вероятным видом преобразования, предшествующего накоплению информации, является унификация сигналов, содержащихся в потоке $S_{сб}[\lambda]$, и ввод результатов преобразования в аналоговой форме в виде потока $S_{np}[\lambda]$ в средства их хранения. В этом случае перед обработкой информации осуществляется со сдвигом во времени преобразование информации $S_{зnp}[X]$, накопленной в аналоговой форме, в кодовые эквиваленты $\lambda[X]$ её оценок.

Возможен вариант, когда оба этапа преобразования связаны с получением оценок характеристик информации $\lambda[X]$, представленных в цифровой форме, но отличающихся по виду: $\lambda_n^*[X]$ и $\lambda^*[X]$. Также как и в варианте (б) на средства представления могут пода-

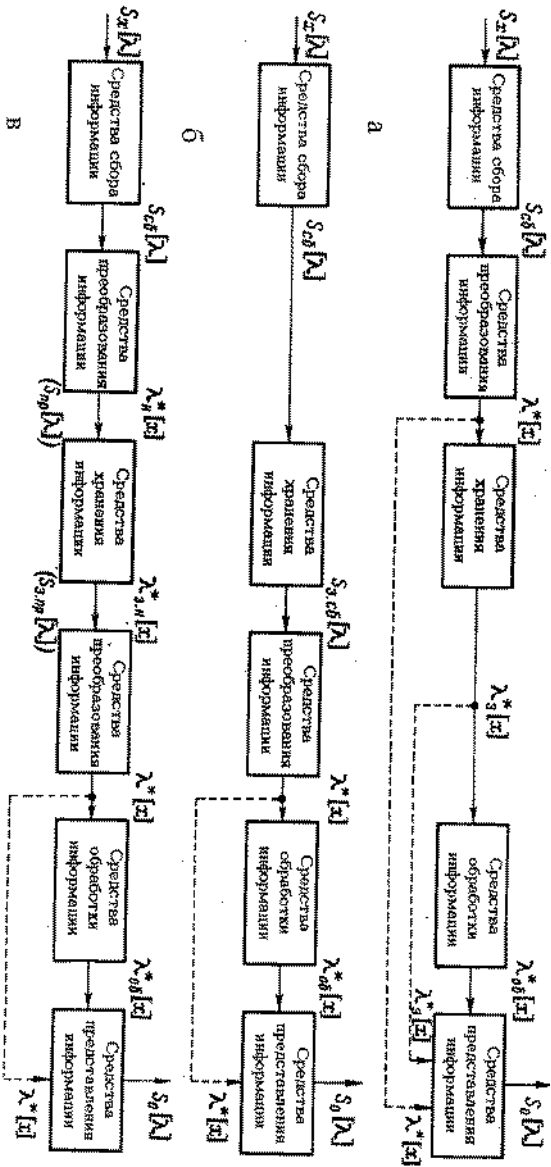


Рис. 4.13. Структурные схемы систем с обработкой информации со сдвигом во времени:

- а - с преобразованием информации, предшествующим её накоплению;
- б - с преобразованием хранимой информации, предшествующим её обработке;
- в - с двойным преобразованием информации, предшествующим её накоплению и обработке

ваться оценки, получаемые в результате обработки $\lambda_{об}^*[X]$ и непосредственно из средств хранения $\lambda^*[X]$.

Для упрощения на рис. 4.13 не показаны потоки информации $S_M[X]$, $S_M[Y]$, и $S_y[Y]$.

По мере совершенствования технических параметров систем (например, точности и быстродействия), определяющих массивы выходной информации, наряду с небольшой и достаточной информацией, содержащейся в этих массивах, растёт и количество избыточной её части. Это существенно затрудняет анализ результатов и приводит к значительным затратам времени, зачастую во много раз превышающего время, необходимое для подготовки и проведения эксперимента. Избыточность результатов измерения при этом может привести к нерациональному использованию вычислительных средств обработки или сделать невозможной применение этих средств из-за их ограниченных возможностей (по объему памяти, скорости обработки и т.д.). Кроме того, количество обработанных данных, поступающих к оператору за сравнительно короткое время, может быть так велико, что появляется диспропорция между высокой производительностью вычислительных машин (арифметических устройств), выполняющих сравнительно простые операции обработки, и низкой производительностью человека, выполняющего достаточно сложный логический анализ результатов.

Сокращение избыточной информации важно также в случае использования при исследованиях каналов связи, так как это позволит снизить требования к пропускной способности этих каналов. Существует множество алгоритмов сокращения избыточной информации и их техническая реализация.

По степени агрегатирования системы делятся на неагрегатированные, агрегатированные и частично агрегатированные. К первой группе относятся системы, состоящие из компонентов, специально разработанных для конкретных систем. Такие системы состоят из первичных измерительных преобразователей и остальной части системы, представляющей собой единое целое или конструктивно разделенной на блоки. Ко второй группе относятся системы, состоящие из агрегатированных компонентов, выбранных из числа средств измерений, выпускаемых промышленностью. К третьей группе относят системы, состоящие как из средств измерений, выпускаемых промышленностью, так и разработанных специально для конкретной системы.

Системы могут быть классифицированы по способу нормирования метрологических характеристик следующим образом: комплексное нормирование для ИИС, параметры которых задаются комплексом нормированных метрологических характеристик для системы в целом; покомпонентное нормирование для ИИС, параметры которых задаются комплексом нормированных метрологических характеристик для отдельных компонентов. Сквозные метрологические характеристики системы определяются при этом аналитически. Соответствующие способы проверки системы при этом бывают комплексные и покомпонентные.

В общем случае (и как правило) система осуществляет некоторое динамическое преобразование входных воздействий $y(t) = A\{x(t)\}$, где $y(t)$ - реакция системы на входное воздействие $x(t)$; A - оператор системы который выражает совокупность динамических свойств системы. Учитывая это, целесообразно в качестве признака классификации ИИС и её компонентов ввести вид оператора. В соответствии с этим различают системы: линейные, нелинейные, а также по форме представления оператора во временной или в комплексной (частотной) областях. Линейный оператор описывается линейной системой дифференциальных уравнений. Наличие в системе хотя бы одного звена с нелинейным дифференциальным уравнением делает систему нелинейной. Во временной области оператор системы может быть представлен в формах: интегральной, дифференциальной, интегродифференциальной, разностной. В комплексной области оператор системы может быть представлен в форме: передаточной функции, отражающей связь между изображениями по Лапласу математических моделей входного и выходного сигналов; комплексной амплитудно-частотной характеристики отражающей связь между преобразованием по Фурье моделей входного и выходного сигналов.

Типовые компоненты и структуры ИИС. Многообразие объектов измерения и условий их эксплуатации привело к появлению большого числа различных по назначению, структуре, алгоритму функционирования и другим признакам систем. Однако, несмотря на это многообразие, ИИС формируется из сравнительно небольшой номенклатуры компонентов.

Основой разделения системы на компоненты служит представление о том, что любой процесс рассматривается как совокупность ряда последовательных измерительных преобразований. Измерительные преобразования составляют этапы процесса измерения от восприятия физической величины до формирования и представления её числового значения в той или иной форме. С этой точки зрения выделяют следую-

щие важнейшие виды измерительных преобразований: первичное восприятие и выделение (селекция) измеряемых физических величин; линейное, функциональное или операционное преобразование промежуточного измерительного сигнала в унифицированный сигнал; квантование измерительного сигнала по уровню и дискретизация по времени; цифровое кодирование; обработка измерительной информации; накопление и хранение измерительной информации; представление измерительной информации в той или иной форме сообщений (число, масштабная диаграмма, информационная модель кодированный сигнал).

Каждый из перечисленных видов измерительных преобразований может осуществляться одним или несколькими видами блоков в зависимости от назначения и принципа построения измерительного канала или системы.

Кроме того, для построения ИИС необходимы и другие устройства, объединяемые в самостоятельные блоки и выполняющие не измерительные преобразования, а служебные функции или функции обработки получаемой информации: коммутаторы кодовых сигналов, кодовые установки, питающие устройства, блоки памяти, арифметические устройства, программирующие устройства, блоки управления, графопостроители и т.п. В табл. 4.2 дается перечень видов измерительных преобразований и соответствующих им технических средств, принятых для агрегатированного комплекса средств электроизмерительной техники (АСЭТ).

Наиболее прогрессивный путь решения задачи серийного проектирования и выпуска ИИС для широкого применения в народном хозяйстве и автоматизации научного эксперимента - это агрегатно-блочное построение требуемой системы из ограниченного набора унифицированных компонентов. Так, во Всесоюзном научно-исследовательском институте электроизмерительных приборов (ВНИИЭП) разработан агрегатированный комплекс средств электроизмерительной техники (АСЭТ), предназначенных для серийного производства типовых ИИС при групповых измерениях электрических сигналов, определении электрофизических свойств материалов, прочностных испытаниях, контроле печатных плат и т.д. Разработаны также агрегатированные комплексы: средств вычислительной техники (АСВТ); сбора и подготовки информации (АСПИ); аналитической техники (АСАТ); средств контроля и регулирования (АСКР); средств телемеханики (АССТ) и др. - всего более 20 наименований.

Таблица 4.2

Выполняемые функции	Применяемые технические средства
1	2
Первичное измерительное преобразование неунифицированных величин в унифицированные электрические величины: с сохранением их вида; с изменением их вида	Первичные измерительные преобразователи
Вторичное измерительное преобразование унифицированных электрических величин: при непосредственном восприятии от объекта; после первичного преобразования; после коммутации; после обработки информации аналоговыми средствами; после хранения информации аналоговыми накопителями; после цифроаналогового преобразования	Масштабирующие, функциональные, операционные измерительные усилители, делители, трансформаторы импедансов, фильтры и др.
Коммутация сигналов при непосредственном сборе от объекта; после первичного преобразования; после вторичного преобразования; после коммутации	Измерительные коммутаторы
Цифроаналоговое преобразование сигналов, получаемых в результате: обработки измерительной информации; хранения измерительной информации; аналого-цифрового преобразования; преобразования одного кода в другой	Цифроаналоговые преобразователи (ЦАП)
Измерение сигналов, полученных: непосредственно от объекта; после первичного преобразования; после вторичного преобразования; после коммутации; после цифроаналогового преобразования; после хранения информации аналоговыми накопителями	Показывающие и регистрирующие аналоговые измерительные приборы

Продолжение 1 табл.4.2

1	2
Обработка измерительной информации, полученной в результате: аналого-цифрового преобразования; измерения цифровыми измерительными приборами; хранения цифровыми накопителями; преобразования кодов одного вида в другой; преобразования графической информации в цифровую; первичного преобразования; вторичного преобразования; коммутации; хранения аналоговыми накопителями	Цифровые ЭВМ, процессоры, компараторы Аналоговые ЭВМ, процессоры, коммутаторы
Накопление и хранение информации, полученной в результате: аналого-цифрового преобразования; измерения цифровыми измерительными приборами; обработки цифровыми средствами; преобразования кодов одного вида в другой; первичного преобразования; вторичного преобразования; коммутации	Цифровые накопители Аналоговые накопители
Представление информации, полученной в результате: аналого-цифрового преобразования; измерения цифровыми измерительными приборами; обработки цифровыми средствами; хранения цифровыми накопителями; преобразования кодов одного вида в другой; цифроаналогового преобразования	Цифровые средства представления Аналоговые средства представления

Эффективность научных исследований, испытательных работ, а также организация управления технологическими процессами с применением ИИС в значительной мере определяется процессами обработки измерительной информации. Целью обработки может быть получение обобщенных характеристик по результатам косвенных или совокупных измерений (законов распределения вероятностей, дисперсий, корреляционных функций, спектральных характеристик) а также выполнение раз-

личного рода операций с сигналами: линеаризация, масштабирование, фильтрация и т.д.

К числу распространённых задач, решаемых посредством обработки получаемых при измерениях результатов следует отнести: определение функциональных зависимостей между отдельными характеристиками объекта эксперимента или между характеристиками объекта и воздействиями на него; исключение влияния на результаты измерений реакции объекта эксперимента на воздействия (факторы), не являющиеся определяющими в данном эксперименте (например, температура при измерении деформации и наоборот и т.д.); исключение влияния на результаты измерения воздействия внешних факторов на средство измерения или учёт этих влияний, что может рассматриваться как косвенный метод повышения помехоустойчивости применяемого средства измерения. Функции обработки могут осуществляться как собственно измерительными устройствами, т.е. в измерительном тракте, так и с помощью самостоятельных устройств, в качестве которых могут использоваться специализированные или универсальные ЭВМ. В первом случае обработка информации выполняется, как правило, в ритме измерений в реальном масштабе времени, во втором обработка может производиться как в реальном масштабе времени, так и со сдвигом во времени.

При сдвиге во времени измерительных и вычислительных операций предусматривается предварительное накопление массивов информации, содержащих результаты измерений, и их последующая обработка. При этом измерительные устройства, устройства обработки и хранения информации могут быть разнесены территориально и даже на значительные расстояния, требующие для передачи информации применения не только проводных (кабельных) линий, но и телеметрических каналов.

Схемы некоторых ИИС приведены на рис. 4.14 - 4.16.

Пример ИИС, построенной на базе измерительно-вычислительного комплекса (ИВК), включающего в свой состав персональную ЭВМ и берущего на себя все функции, связанные с аналого-цифровым преобразованием унифицированных электрических сигналов, обработкой и представлением информации приведён на рис.4.15. К унифицированным входам ИВК подключаются датчики быстропеременных процессов ДВС со своими согласующими усилителями и создаётся прикладное программно-алгоритмическое обеспечение.

Так как рабочие процессы включают в себя ряд процессов, характеризующих работу дизеля (индикаторный, подачи топлива, линейных перемещений и т.д.), то требования к их регистрации и анализу по частотам дискретизации и уровням квантования зависят от задач, поставленных пользователями комплексов в соответствии с планом измерений. Поэтому

ИВК в диалоговом режиме обеспечивает выбор входных каналов, установление переменных шагов дискретизации входных процессов, снижение размерности входной информации, вычисление усредненных реализаций, накопление (регистрацию) информации.

ИВК имеет три основных режима:

1) измерение и регистрация входной информации в соответствии с заданием оператора - "планом измерений": задаётся количество каналов; шаг дискретизации, изменяющийся в пределах цикла работы дизеля; количество усредняемых отсчётов; степень снижения размерности (при необходимости), т.е. прореживания входной информации;

2) вычисление параметров по зарегистрированным данным (например, P_z ; $(dP/d\varphi)_{\max}$ и т.д.) и их масштабирование по результатам градуировки;

3) отображение, документирование и запись данных на магнитные носители для формирования базы данных по испытываемым двигателям.

ИИС содержит 8 измерительных каналов. При этом можно измерить одновременно 8 процессов, отражающих работу одного цилиндра или один процесс (индикаторную диаграмму) по 8 цилиндрам. Для получения зависимости параметров ДВС от времени и фазового положения (угла поворота коленчатого вала -ПКВ) в составе ИИС имеется измерительный канал, обеспечивающий измерение и регистрацию временных интервалов в цикле работы ДВС, синхронизированных с отсчётами по углу ПКВ. Синхронизация измерений обеспечивается двумя последовательностями входных импульсных сигналов, поступающими с датчика угловых перемещений. К ним относятся: маркерный сигнал цикла ММ, следующий с периодом, равным длительности одного цикла работы ДВС и позволяющий производить его привязку к моментам верхней или нижней мёртвым точкам (ВМТ или НМТ) любого цилиндра 2-тактных и 4-тактных ДВС во всём диапазоне частот вращения (0-6000об./мин); сигнал угловых меток УМ, равномерно распределённых внутри периода следования маркерного сигнала. ИВК обеспечивает любой шаг дискретизации по углу ПКВ внутри цикла, в том числе и неравномерный, кратный минимальному шагу, равному $0,1^\circ$.

Структура ИВК для регистрации быстропеременных процессов ДВС приведена на рис.4.15, а ИИС - рис.4.16. ИИС содержит следующие измерительные каналы: измерения избыточного давления в камере сгорания ДВС (канал ДЦ); измерения избыточного давления в топливопроводе высокого давления (канал ДТ); измерения угла ПКВ (канал ПВ). В состав измерительных каналов входят: измерительная часть ИВК, датчики физических процессов ДВС, согласующие (нормирующие) усилители - вторичные измерительные преобразователи сигналов с датчиков.

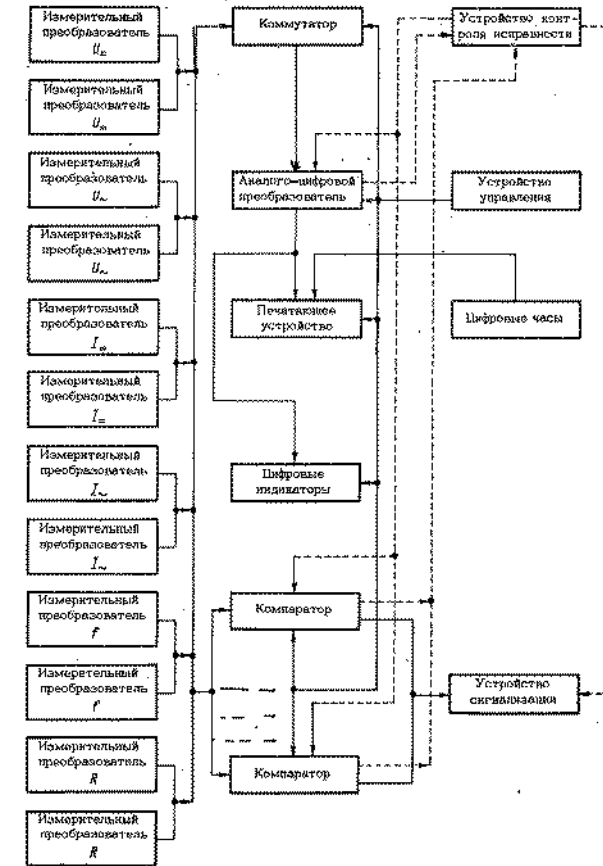


Рис.4.14. Структурная схема ИИС для измерения и контроля параметров электроэнергетических объектов

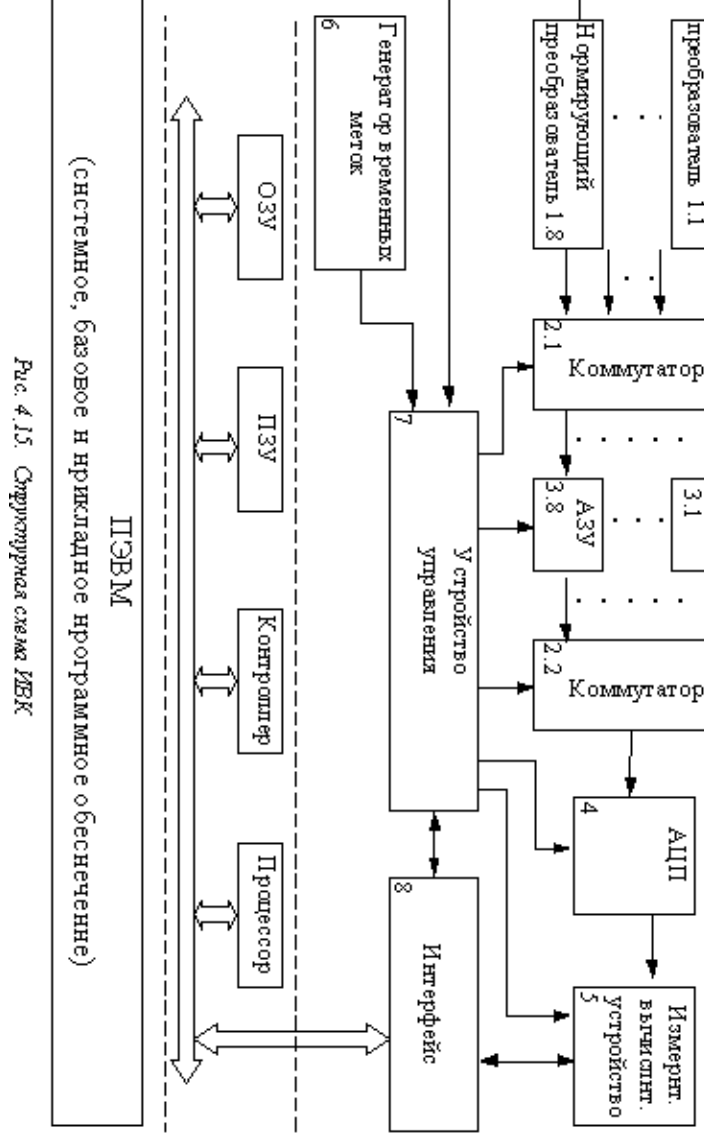


Рис. 4.15 Структурная схема ИБК

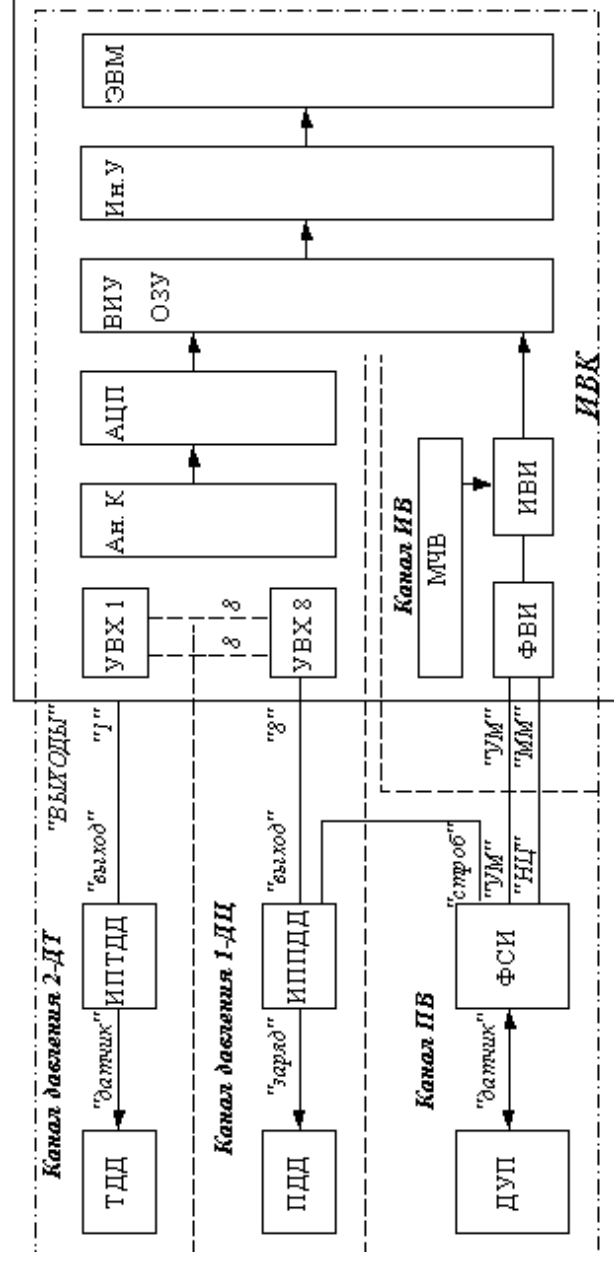


Рис. 4.16 Структурная схема ИБК: АЦП – аналого-цифровой преобразователь; АнК – аналоговый коллектор; ВПУ – вычислительная периферийное устройство; ИВ – измерительный интерфейс; Ив.У – интерфейсное устройство; ДУП – датчик угла поворота; ИППД, ИПТДД – ступенчатые измерительные преобразователи пельзо- и тензодатчиков соответственно; ИЧВ – измерительная часть прибора хранения; ФВИ – устройство выборки и хранения; ФБИ – ФСИ – формирователи элементов интерфейсов и сигналов управления

Тема 5. Интерфейсы программируемых систем управления

5.1. Термины и определения

Создание современных средств вычислительной техники связано с задачей объединения в единый комплекс различных блоков ЭВМ, устройств хранения и отображения информации, измерительных приборов, устройств для связи с объектом (УСО), аппаратуры передачи данных и непосредственно ЭВМ. Эта задача возлагается на унифицированные системы сопряжения — интерфейсы. Термин «интерфейс» обычно трактуется как синоним слова «сопряжение» и понимается как совокупность схмотехнических средств, обеспечивающих непосредственное взаимодействие составных элементов устройства, системы. Нередко это определение используется для обозначения составных компонентов интерфейса. В одних случаях под интерфейсом понимают программные средства, обеспечивающие взаимодействие программ операционной системы, в других — устройства сопряжения, обеспечивающие взаимосвязь между составными функциональными блоками или устройствами системы.

Для акцентирования внимания на комплексном характере интерфейса используются термины «интерфейсная система», «программный интерфейс», «физический интерфейс», «аппаратурный интерфейс» и т. п. Согласно ГОСТ 15971—74 под *стандартным интерфейсом* понимается совокупность унифицированных аппаратурных, программных и конструктивных средств, необходимых для реализации взаимодействия различных функциональных элементов в автоматических системах сбора и обработки информации при условиях, предписанных стандартом и направленных на обеспечение информационной, электрической и конструктивной совместимости указанных элементов. Структурная схема интерфейса показана на рис. 5.1.

Проектирование интерфейсов выполняется на основе четырех основных взаимосвязанных принципов: группового, агрегатирования, унификации, взаимозаменяемости.

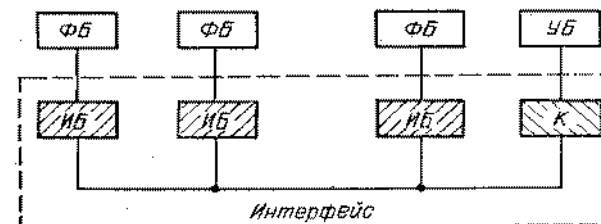


Рис. 5.1. Структурная схема интерфейса:
ФБ — функциональный блок; ИБ — интерфейсный блок; К — контроллер; УБ — управляющий блок

Принцип группового проектирования заключается в создании ряда (семейства) функционально и конструктивно подобных устройств (модулей, систем) определенного назначения, соответствующих разнообразным условиям их использования. Основная задача группового проектирования — достижение максимальной универсальности и совместимости ЭВМ, вычислительных комплексов (ВК) внутри проектируемого ряда. Примером эффективного использования принципа группового проектирования являются разработки ряда IBM PC.

Принцип агрегатирования (модульного построения) состоит в рациональном разделении системы, устройства на совокупность более простых функционально и конструктивно законченных блоков (модулей) с целью совершенствования их технических характеристик, а также обеспечения высокопроизводительных способов производства и обслуживания. Примером применения модульного проектирования является разработка параметрических рядов модулей IBM PC и микропроцессорных комплектов больших интегральных схем (МПК БИС).

Принцип унификации заключается в минимизации номенклатуры составных узлов, блоков устройства, модулей, связей между ними при условии рациональной компоновки и эффективного функционирования устройства или системы. Интерфейс можно рассматривать как практический пример унификации связей и устройств сопряжения составных элементов ЭВМ и систем.

Принцип взаимозаменяемости основывается на способности модуля выполнять в устройстве различные установочные функции без дополнительной конструкторской доработки. Взаимозаменяемость является следствием процесса унификации. Эта характеристика определяет степень универсальности устройства. Примером взаимозаменяемости может служить так называемая универсальная ин-

терфейсная карта (или программируемый интерфейс), являющаяся базой ряда устройств ввода-вывода (УВВ)

Эффективное использование рассмотренных принципов проектирования при разработке и внедрении интерфейсов и устройств сопряжения позволяет: организовать крупносерийное производство; повысить качество; сократить сроки изготовления; снизить стоимость производства, отладки и эксплуатации; осуществить преемственность технических решений и удлинить сроки морального старения средств ВТ.

Основным назначением интерфейса является унификация внутрисистемных и межсистемных связей и устройств сопряжения с целью эффективной реализации прогрессивных методов проектирования функциональных элементов вычислительных систем.

Основные функции интерфейса заключаются в обеспечении информационной, электрической и конструктивной совместимости между функциональными элементами системы.

Информационная совместимость — это согласованность взаимодействий функциональных элементов системы в соответствии с совокупностью логических условий.

Логические условия определяют: структуру и состав унифицированного набора шин; набор процедур по реализации взаимодействия и последовательность их выполнения для различных режимов функционирования; способ кодирования и форматы данных, команд, адресной информации и информации состояния; временные соотношения между управляющими сигналами, ограничения на их форму и взаимодействие.

Логические условия информационной совместимости определяют функциональную и структурную организацию интерфейса. Для большинства интерфейсов эти условия в основном стандартизируются или же носят рекомендательный характер. Условия информационной совместимости определяют объем и сложность схмотехнического оборудования и программного обеспечения, а также основные технико-экономические показатели — пропускную способность и надежность интерфейса, а также объем аппаратурных затрат на устройства сопряжения.

Электрическая совместимость — это согласованность статических и динамических параметров электрических сигналов в системе шин с учетом ограничений на пространственное размещение устройств интерфейса и техническую реализацию приемопередающих элементов.

Условия электрической совместимости определяют: тип приемопередающих элементов; соотношение между логическим и электрическим состояниями сигналов и пределы их изменения; коэффициенты нагрузочной способности приемопередающих элементов и значения допустимой емкостной и резистивной нагрузки линии в устройстве; схему согласования линии; допустимую длину линии и порядок подключения линий к разъемам; требования к источникам и цепям электрического питания (при наличии в системе линий напряжения питания); требования по помехоустойчивости и заземлению.

Условия электрической совместимости влияют на такие характеристики интерфейса, как скорость обмена данными, конфигурация размещения устройств и расстояния между ними, предельно допустимое число подключаемых устройств и помехозащищенность. Требования электрической совместимости тесно связаны с характеристиками приемопередающих интегральных микросхем. Обычно тип приемопередающих элементов и большинство условий электрической совместимости регламентируются стандартом.

Конструктивная совместимость — это согласованность конструктивных элементов интерфейса, предназначенных для обеспечения механического контакта электрических соединений и механической замены схемных элементов, блоков и устройств.

Условия конструктивной совместимости определяют типы: соединительных элементов (разъем, штекер и распределение линий связи внутри соединительного элемента); конструкции платы, каркаса, стойки; конструкции кабельного соединения.

В рекомендациях стандартных интерфейсов условия конструктивной совместимости не всегда определяются полностью. Например, в некоторых стандартах оговариваются лишь требования по использованию разъемов и типа кабеля, в других определяются размеры и перечень конструктивов.

Применение рассмотренных принципов проектирования тесно связано со стандартизацией.

Качество стандарта на интерфейс может быть оценено соотношением, устанавливаемым между ограничениями на реализацию интерфейса и устройств сопряжения и возможностями варьирования тех или иных технических характеристик интерфейса с целью наиболее эффективного приспособления его к конкретной системе. Слишком жесткая регламентация условий совместимости ограничивает область применения интерфейса или же вызывает неопти-

мальное его использование. Однако при этом упрощается задача проектирования устройств сопряжения. В противоположном случае увеличивается вероятность несовместимости интерфейсного оборудования, разрабатываемого различными производителями.

Степень стандартизации большинства внутрисистемных интерфейсов мини-, микроЭВМ и систем на их основе определяется в основном уровнем отраслевых стандартов. Эта ситуация обусловлена исторически сложившимся процессом разработки и развития данного класса средств ВТ, а также быстрой сменой технологии. Жесткая зависимость интерфейсов от архитектурных особенностей ЭВМ является одной из причин, препятствующих унификации многочисленных модификаций интерфейсов. Однако на определенном этапе развития технологии тенденция сохранения интерфейса снижает эффективность использования средств ВТ и возможность внедрения новых принципов построения мини- и микроЭВМ и систем на их основе.

Опыт показывает, что унификация и стандартизация наиболее широко применяемых интерфейсов в общегосударственном масштабе дают значительный экономический эффект.

Современные темпы развития микроэлектронной технологии, а также тенденции и практика построения микропроцессорных систем в настоящее время определили следующие направления развития интерфейсов:

1. Дальнейшее повышение уровня унификации интерфейсного оборудования и стандартизации условий совместимости существующих наиболее распространенных интерфейсов на основе обобщения опыта их широкого использования. Это совершенствование направлено на создание новых стандартных интерфейсов или на повышение уровня стандартизации существующих.

2. Модернизация и расширение функциональных возможностей существующих интерфейсов без нарушения условий совместимости благодаря новейшим достижениям в микроэлектронной технологии и технологии разработки средств передачи информации. Основная цель этого направления — удлинение сроков морального старения стандартных интерфейсов и расширение области их применения.

3. Создание принципиально новых интерфейсов и разработка требований на их унификацию и стандартизацию. Эта тенденция обусловлена в первую очередь разработкой систем с параллельной распределенной обработкой ин-

формации на основе качественно новых принципов организации вычислительного процесса, а также интегрированных распределенных систем.

5.2. Принципы организации интерфейсов

Составными физическими элементами связей интерфейса являются электрические цепи, называемые *линиями интерфейса*. Часть линий, сгруппированных по функциональному назначению, называется *шиной*, а вся совокупность линий — *магистралью*. В системе шин интерфейсов условно можно выделить две магистрали: информационного канала и управления информационным каналом.

По информационной магистрали передаются коды данных, адресов, команд и состояний устройств. Аналогичные наименования присваиваются соответствующим шинам интерфейса.

Коды данных представляют информацию о процессах, протекающих в ВС. Обычно в машинных интерфейсах используется двоичное кодирование в формате машинного кода, в измерительных интерфейсах — стандартные коды.

Коды адресов предназначены для выборки в магистрали устройств, узлов устройства, ячеек памяти. Обычно для адресации используется двоичный код, однако нередко применяется и позиционное кодирование, при котором каждому устройству выделяется отдельная линия. Примером реализации такой системы адресации является интерфейс 2К в СМ ЭВМ.

Коды команд используются для управления функционированием устройств и обеспечения сопряжения между ними. В стандартах на интерфейс регламентируется минимально необходимый набор команд, который может быть расширен пользователем за счет резервных полей в кодах. По функциональному назначению различают адресные команды управления обменом информацией между устройствами, команды изменения состояния и режимов работы. К наиболее распространенным командам относятся: «Чтение», «Запись», «Конец передачи», «Запуск».

Коды состояния представляют собой сообщения, описывающие состояния устройств сопряжения. Коды формируются в ответ на действия команд или являются отображением состояний функционирования устройства, таких как «Занятость устройства», «Наличие ошибки», «Готовность устройства» к приему или передаче информации и т. п.

В большинстве случаев коды данных, адресов, команд и состояний передаются по шинам интерфейса с разделе-

нием времени за счет мультиплексирования шин. Это достигается введением дополнительных линий для обозначения типа передаваемой информации, называемых *линиями идентификации*. Их применение позволяет существенно сократить общее число линий информационной магистрали интерфейса, однако при этом происходит снижение быстродействия передачи информации.

Магистраль управления информационным каналом по своему функциональному назначению делится на ряд шин: управления обменом, передачи управления, прерывания, специальных управляющих сигналов.

Шина управления обменом включает в себя линии синхронизации передачи информации. В зависимости от принятого принципа обмена (асинхронного, синхронного) число линий может изменяться от одной до трех. Асинхронная передача происходит при условии подтверждения приемником готовности к приему и завершается подтверждением о приеме данных. При синхронной передаче темп выдачи и приема данных задается регулярной последовательностью сигналов. Линии шины управления обменом в случае двунаправленной информационной магистрали выполняются, как правило, двунаправленными.

Шина передачи управления выполняет операции приоритетного занятия магистрали информационного канала. Наличие этой шины определяется тем, что взаимодействие в большинстве интерфейсов выполняется по принципу «ведущий-ведомый», или «задатчик-исполнитель», при котором «ведущее» устройство может брать управление шиной на себя в определенные моменты времени. При наличии в системе нескольких устройств, способных выполнять функции «ведущего», возникает проблема приоритетного распределения ресурсов шины (арбитража). Состав и конфигурация линий этой шины зависят от структуры управления интерфейсом. Различают децентрализованную и централизованную структуры. В интерфейсах, предназначенных для объединения только двух устройств (соединение типа «точка-точка»), шина передачи управления отсутствует.

Шина прерывания применяется в основном в машинных интерфейсах мини- и микроЭВМ и программно-модульных систем. Основная ее функция — идентификация устройства, запрашивающего сеанс обмена информацией. Идентификация состоит в определении контроллером (процессором) исходной информации о запрашиваемом устройстве. В качестве информации об устройстве используется адрес источника прерывания либо адрес программы обслуживания прерывания (вектор прерывания).

Шина специальных управляющих сигналов включает в себя линии, предназначенные для обеспечения работоспособности и повышения надежности устройств интерфейса. К этим линиям относятся: линии питания, контроля источника питания, тактирующих импульсов, защиты памяти, общего сброса, контроля информации и т. п.

В соответствии с существующим стандартом (ГОСТ 26.016—81) *структуры связей интерфейсов* подразделяются на следующие классы: магистральную; радиальную; цепочечную и смешанную (комбинированную). Тем не менее такое разделение не позволяет дать детального представления о пространственном размещении функциональных устройств и устройств сопряжения, а также о возможностях взаимосвязи этих устройств, т. е. их связности. *Связность линии* определяет возможность двустороннего или одностороннего направления передачи сигналов, т. е. передачи в прямом и обратном направлениях. Для однонаправленных линий связи возрастает пропускная способность информационной магистрали, упрощаются приемопередающие элементы и улучшается согласование линий. Однако применение однонаправленных линий приводит к увеличению общего числа линий.

Функциональная организация определяет ряд основных функций интерфейса, которые необходимо реализовать для обеспечения информационной совместимости. К ним относятся: селекция информационного канала, синхронизация обмена информацией, координация взаимодействия, буферное хранение информации, преобразование формы представления информации.

Первые три функции возлагаются на канал управления, четвертая и пятая — на информационный канал. Рассмотрим особенности логической и схемотехнической реализации указанных функций в типовых интерфейсах, используемых в ВС и локальных сетях массового применения.

Селекция, или арбитраж, информационного канала обеспечивает однозначность выполнения процессов взаимодействия сопрягаемых элементов системы посредством приоритетного разрешения внутриорганизационных конфликтов. Наличие конфликтов при доступе к информационному каналу является следствием взаимодействия параллельных процессов, протекающих в системе обработки информации. При взаимодействии устройств, функционирующих параллельно во времени с общим информационным каналом, возможны конфликты двух уровней: при доступе устройства к информационному каналу интерфейса, при доступе одного устройства к другому.

Операции контроля направлены на обеспечение надежности функционирования интерфейса и достоверности передаваемых данных. В них входят: разрешение тупиковых ситуаций асинхронного процесса взаимодействия и повышение достоверности передаваемых данных. Возникновение тупиковых ситуаций свойственно процессам асинхронного взаимодействия, например, в схемах синхронизации передачи слова, построенных по принципу обратной связи, в схеме приоритетной выборки на основе последовательного алгебраического опроса и т. п.

Функции обмена и преобразования информации выполняются информационным каналом интерфейса. К основным процедурам функции обмена относятся прием и выдача информации (данных, состояния, команд, адресов) регистрами составных устройств системы. Основными операциями функции преобразования являются: изменение параллельного кода в последовательный и наоборот, перекодирование информации, дешифрация команд, адресов, логические действия под содержимым регистра состояния. Эти операции в устройствах интерфейса реализуются дешифраторами, дешифраторами, регистрами сдвига, схемами свертки и сравнения. Схемотехническая реализация операций преобразования специфична для каждого устройства интерфейса

5.3. Классификация интерфейсов

В настоящее время не существует достаточно полной объективной классификации интерфейсов. Имеющиеся классификации основываются, как правило, на одном классификационном признаке или же строятся для одного класса интерфейсов. Определенным обобщением этих классификаций является стандарт на классификационные признаки интерфейсов (ГОСТ 26.016-81), включающий четыре признака классификации: способ соединения компонентов системы (магистральный, радиальный, цепочечный, смешанный); способ передачи информации (параллельный, последовательный, параллельно-последовательный); принцип обмена информацией (асинхронный, синхронный); режим передачи информации (двусторонняя одновременная передача, двусторонняя поочередная передача, односторонняя передача).

Указанные признаки позволяют характеризовать только определенные аспекты организации интерфейсов. Более полная характеристика и систематизация интерфейсов могут быть выполнены при условии классификации по

Таблица 5.1

Интерфейсы ВС на базе мини- и микроЭВМ

Область распространения интерфейса	Наименование интерфейса	Уровень стандартизации
<i>Машинные интерфейсы однопроцессорных ЭВМ</i>		
Мини-ЭВМ с раздельными шинами адреса и данных интерфейса	Unibus Общая шина CM I/O Nova	Фирма CM ЭВ. Фирма
МикроЭВМ с совмещенными шинами адреса и данных интерфейса	Q-bus LSI МПИ Q-bus Pro350	Фирма ОСТ Фирма
<i>Интерфейсы магистрально-модульных ВС</i>		
ВС с раздельными шинами адреса и данных интерфейса	Multibus I, P-796 I41CM VME-bus SAMAC COMPEX	Фирма, IEC CM ЭВМ. Фирма, IEC IEC Пр. IEEE
ВС с совмещенными шинами адреса и данных интерфейса	iPSB/Multibus II Evrobus, ESSS P-896 Fastbus, P-960	Фирма Ст. Великобритании Пр. IEEE NIM, IEC
<i>Интерфейсы программно-модульных периферийных систем</i>		
8-разрядные системы	HP-IB, КОП	IEC, ГОСТ
16-разрядные системы	ISI	Пр. ANSI
24-разрядные системы	HW SAMAC, ПВ КАМАК	IEC, ГОСТ
<i>Малые интерфейсы периферийного оборудования</i>		
Локальные УВВ	BS 4421, ИРПР	Ст. Великобритании, CM ЭВМ.
Локальные и удаленные УВВ	CL, ИРПС	Ст. EIA, CM ЭВМ
Магнитные диски	ИКМД, ИСМД, ИГМД	CM ЭВМ
Магнитные ленты	ИНМЛ, ИКМЛ	CM ЭВМ
<i>Интерфейсы распределенных систем общего назначения</i>		
СПД общего пользования	X.21, X.21-bis, X.25	Пр. ССТТТ
Локальные сети общего назначения	Ethernet, Polynet P-802	Фирма Пр. IEEE, ISO
Малые локальные сети	HP-IB I ² C, D ² B	IEC Фирма
<i>Интерфейсы распределенных систем управления</i>		
Научные исследования	SH SAMAC, ПМ КАМАК	IEC, ГОСТ
Технологические процессы	Proway, ИЛПС2	Пр. IEC, Пр. CM ЭВМ
Специальные системы	MIL-1553, МК	Ст. США, ГОСТ
Малые системы	Serial HP-IB	Фирма. Пр. IEC

Окончание табл. 5.1

Область распространения интерфейса	Наименование интерфейса	Уровень стандартизации
<i>Физические интерфейсы сетей общего пользования</i>		
Телефонные каналы	RS-232-C, V.24, стык С2	EIA, CCITT, ГОСТ
Согласованные ФЛ	RS-422, стык С2-ИС	ССИТТ, ГОСТ
Несогласованные ФЛ	RS-423, стык С2-ИС	ССИТТ, ГОСТ
Четырехпроводные ФЛ	V.2, G-703 стык С1-ФЛ	ССИТТ, ГОСТ

Примечания: ГОСТ — Государственный стандарт; ОСТ — Отраслевой стандарт; Пр. — проект стандарта; Ст. — стандарт; ANSI — Американский национальный институт стандартов; ССИТТ — Международный консультативный комитет по телефонии и телеграфии (МККТТ); ИЕС — Международная электротехническая комиссия (МЭК); IEEE — Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике США; ISO — Международная организация по стандартизации (МОС).

нескольким совокупностям признаков: области распространения (функциональному назначению); логической и функциональной организации; физической реализации.

В соответствии с первой совокупностью признаков интерфейсы можно разделить на следующие основные классы: машинные (или системные); периферийного оборудования; мультимикропроцессорных систем; распределенных ВС (вычислительных и локальных сетей, распределенных систем управления). В табл. 5.1 приведены наименования некоторых интерфейсов.

Машинные интерфейсы предназначены для организации связей между составными компонентами ЭВМ, ВК, ВС, т. е. непосредственно для их построения и связи с внешней средой.

Интерфейсы периферийного оборудования выполняют функции сопряжения процессоров, контроллеров с УВВ, измерительными приборами, исполнительными механизмами, аппаратурой передачи данных (АПД) и внешними запоминающими устройствами (ВЗУ).

Интерфейсы мультимикропроцессорных систем представляют собой в основном магистральные системы сопряжения, ориентированные на объединение в единый комплекс нескольких процессоров, модулей оперативных запоминающих устройств (ОЗУ), контроллеров ВЗУ, ограниченно размещенных в пространстве.

Интерфейсы распределенных ВС предназначены для интеграции средств обработки информации, размещенных на значительном расстоянии.

Машинные интерфейсы можно разделить соответственно по классам ЭВМ на три группы. Первую группу составляют интерфейсы ввода-вывода ЭВМ с разделенными информационными каналами к УВВ и ОЗУ.

Ко второй группе относятся интерфейсы ЭВМ с объединенным информационным каналом к УВВ и ОЗУ — типа «Общая шина» (ОШ) с возможностью кабельного расширения шин. Типичными примерами этой архитектуры ЭВМ являлись мини-ЭВМ класса СМ ЭВМ, Электроника 100-25, микроЭВМ Электроника 60, Электроника ИЦ-80, а также некоторые классы персональных ЭВМ (IBM PC и др.)

В третью группу входят интерфейсы одноплатных ЭВМ с объединенным информационным каналом к УВВ и ОЗУ — типа «Общая шина», ориентированные на внутрислатное и внутрисхемное применение. Такого класса интерфейсы предназначены для организации сопряжения между составными компонентами МКП БИС, а также составных функциональных узлов сверхбольших интегральных схем (СБИС) микроЭВМ.

Интерфейсы периферийного оборудования представляют самый большой класс систем сопряжения, что объясняется широкой номенклатурой и разнообразием периферийного оборудования. По своему функциональному назначению эти интерфейсы могут быть разделены на группы интерфейсов радиальной структуры (обеспечивающие схему сопряжения «точка-точка») и магистральной структуры (обеспечивающие схему «многоточечного» подключения).

Системы сопряжения первой группы составляют в основном так называемые малые интерфейсы, применяемые для сопряжения исполнительных механизмов ввода-вывода с контроллерами. К этим интерфейсам относятся: системы сопряжения с параллельной передачей информации (ИРПР), предназначенные для подключения стандартной периферии, системы сопряжения для подключения устройств, размещенных на большом удалении друг от друга.

Интерфейсы второй группы используются как самостоятельно, так и в качестве системотехнического дополнения, расширяющего функциональные возможности ЭВМ на уровне связи с объектом управления. К ним относятся магистральные интерфейсы программно-модульных систем типов ИЕС 625-1, САМАС ИЕС 552. Эти интерфейсы обеспечивают сопряжение программируемых контроллеров и ЭВМ с широким спектром цифровых измерительных приборов, преобразователей информации, генераторов, датчиков, пультов оператора.

В группу интерфейсов мультимикропроцессорных сис-

тем входят в основном внутриблочные, процессорно-независимые системы сопряжения. Характерным их отличием от интерфейсов типа «Общая шина» является техническая реализация функций селекции и координации, что позволяет подключать к ним один или несколько процессоров как обычные УВВ. Этот класс интерфейсов отличают высокая пропускная способность и минимальное время доступа процессора к общей ОЗУ.

Данный класс систем сопряжения может быть разделен на две крупные группы в соответствии со структурой шин адреса и данных: с раздельными и мультиплексными шинами. Как правило, эти интерфейсы представляют собой внутриблочную систему сопряжения магистральной структуры с высокой пропускной способностью.

Интерфейсы распределенных ВС ориентированы на использование в системах различного функционального назначения. Обычно это системы сопряжения с бит-последовательной передачей информации магистральной или кольцевой структуры. Этот класс интерфейсов в зависимости от назначения разделяется на группы интерфейсов: малых локальных и локальных сетей (с длиной магистрали от десятков метров до нескольких километров); распределенных систем управления; территориально и географически распределенных сетей ЭВМ (с длиной линии более десяти километров).

Классификация интерфейсов по функциональной организации может быть выполнена раздельно по информационному и управляющему каналам. Классификация строится по признакам двух уровней: основному и дополнительному, каждый из которых может быть отмечен соответствующей мнемоникой (табл. 5.2) Подробное описание этих признаков рассмотрено в п5.1. В табл. 5.3—5.9 отражены характеристики дополнительных признаков.

По конструктивному исполнению интерфейсы могут быть разделены на четыре категории: межблочные, обеспечивающие взаимодействие компонентов на уровне прибора, автономного устройства, блока, стойки, шкафа: внутриблочные, обеспечивающие взаимодействие на уровне плат, субблоков; внутриплатные, обеспечивающие взаимосвязь между интегральными схемами (СИС, БИС, СБИС) на печатной плате; внутрикорпусные, обеспечивающие взаимодействие компонентов внутри СБИС.

Межблочное сопряжение реализуется на уровне следующих конструктивных средств: коаксиального и оптоволоконного кабеля; многожильного плоского кабеля (шлейфа); многожильного кабеля на основе витой пары.

Таблица 5.2

Признаки классификации интерфейсов

Основной признак	Дополнительный признак
<i>Информационный канал</i>	
Структура шин	Магистральная разомкнутая Магистральная замкнутая Цепочечная разомкнутая Цепочечная замкнутая Комбинированная
Способы обмена данными	Однобитный последовательный Однобайтный параллельный Двухбайтный параллельный Трехбайтный параллельный Четырехбайтный параллельный
Режимы передачи	Однонаправленный (симплексный) Двунаправленный полудуплексный Двунаправленный дуплексный
Виды совмещения шин	Полное разделение шин Частичное совмещение шин Полное совмещение шин
<i>Управляющий канал</i>	
Структура управления	Централизованная Децентрализованная
Принципы селекции	Последовательный цепочечный опрос Последовательное адресное сканирование Параллельное адресное сканирование Параллельное сравнение приоритета Временная селекция
Принципы обмена данными	Синхронный без обратной связи Асинхронный с однопроводной обратной связью Асинхронный с двухпроводной обратной связью

Таблица 5.3

Структуры информационного канала

Наименование	Характеристика	Пример интерфейса
Магистральная разомкнутая	Все устройства соединены с разомкнутой шиной параллельно	ОШ, И41, IEC 625-1

Продолжение табл. 5.3

Наименование	Характеристика	Пример интерфейса
Магистральная замкнутая	Все устройства соединены с замкнутой шиной параллельно	ОШ, И41, IEC 625-1
Цепочечная разомкнутая	Все устройства соединены между собой последовательно в разомкнутую цепь канала	
Цепочечная замкнутая или кольцевая	Все устройства соединены между собой последовательно в замкнутую цепь канала	Кольцевые ЛС, SAMAC IEC 640
Комбинированная	Сочетает вышеперечисленные признаки	SAMAC IEC 516

Таблица 5.4

Способы обмена данными по информационным шинам

Наименование	Характеристика	Пример интерфейса
Однобитовый последовательный	Поразрядно по одной линии связи канала	ИРПС, ИЛПС2
Однобайтовый параллельный	Одновременная передача данных по восьми линиям	IEC 625-1, ОШ СМ
Двухбайтовый параллельный	Одновременная передача данных по 16 линиям	
Трехбайтовый параллельный	Одновременная передача данных по 24 линиям	SAMAC IEC 516
Четырехбайтовый параллельный	Одновременная передача данных по 32 линиям	Fastbus

Таблица 5.5

Режим передачи

Наименование	Характеристика направления	Пример интерфейса
Однонаправленный (симплексный)	В одном определенном направлении	ИРПР, ИРПС

Продолжение табл. 5.5

Наименование	Характеристика направления	Пример интерфейса
Двунаправленный полудуплексный	Поочередно в каждом из двух направлений	ОШ, IEC 625-1
Двунаправленный дуплексный	Одновременно в каждом из двух направлений	

Таблица 5.6

Виды совмещения шины

Наименование	Характеристика	Пример интерфейса
Полное разделение шин	Все виды информации передаются по отдельным шинам	S-100
Частичное совмещение шин	Два и более вида информации передаются по одной шине в разные моменты времени	Q-bus, ИРПР
Полное совмещение шин	Все виды информации передаются по одной и той же шине в разные моменты времени	IEC 625-1

Таблица 5.7

Структура управления

Наименование	Характеристика	Пример интерфейса
Централизованная	Имеется только одно устройство управления интерфейсом	ОШ, IEC 516
Децентрализованная	Средства управления интерфейсом распределены или могут быть распределены по устройствам сопряжения элементов системы	P-896, Fastbus

Таблица 5.8

Принципы селекции		
Наименование	Характеристика	Пример интерфейса
Последовательный (цепочечный) опрос	Последовательное прохождение сигнала опроса, начиная с наиболее приоритетного устройства	ОШ, И41
Последовательное адресное сканирование	Последовательная выдача двоичных адресов источников	IEC 625-1
Параллельное адресное сканирование	Одновременная передача сигналов приоритета от устройств	IEC 625-1
Параллельное сравнение приоритета	Выделение на шине наиболее приоритетного двоичного адреса источника запроса	P-896, Fastbus
Временная селекция	Выбор источника через выделенные интервалы времени	

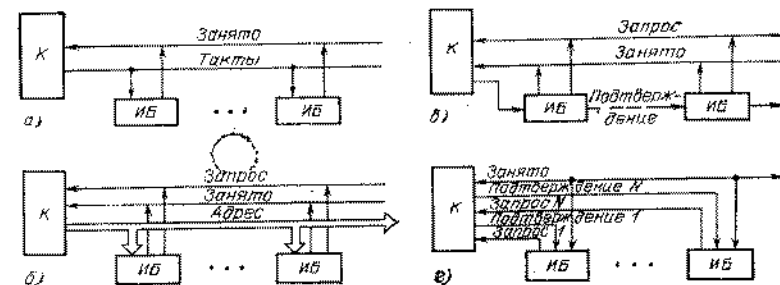


Рис. 5.2. Схемы селекции магистрали централизованной структуры: К — контроллер; ИБ — интерфейсный блок

Схемы методов селекции магистрали централизованной и децентрализованной структуры, а также цепочечной селекции приведены на рис. 5.2-5.4.

Управление операциями селекции выполняется централизованно и децентрализованно. Основным признаком централизованной структуры управления селекцией является в большинстве случаев наличие разомкнутых линий шин передачи управления и прерывания, а также отдельного функционального узла управления операциями селекции — арбитра. В децентрализованной структуре соответствующие линии являются двунаправленными или же замкнутыми однонаправленными, а схема арбитра симметрично распределена по устройствам сопряжения.

Возможные способы селекции информационной магистрали централизованной структуры представлены на рис. 5.2. На рис. 5.2,а показана реализация временной селекции магистрали на основе генератора временных интервалов контроллера. В этом случае магистраль предоставляется каждому устройству через равные промежутки времени, определяемые скоростью работы генератора, а моменты занятия магистрали определяются двоичными счетчиками, синхронно работающими в каждом из подключаемых устройств. Такое решение обеспечивает дисциплину приоритетного обслуживания «первый пришел — последний обслуживается» и не обеспечивает дисциплину «первый пришел — первый обслужен».

На рис. 5.2,б показан вариант пространственной селекции на основе последовательного адресного сканирования источников запроса. Выбор источника запроса начинается по общему сигналу запроса и выполняется последовательной кодовой адресацией всех подключаемых устройств в

Таблица 5.9

Принципы обмена данными		
Наименование	Характеристика процесса передачи данных	Пример интерфейса
Синхронный (без обратной связи)	С помощью регулярной последовательности управляющих сигналов	IEC 516
Асинхронный с однопроводной обратной связью	Происходит до получения сигнала, подтверждающего прием данных	ОШ, И41
Асинхронный с двухпроводной обратной связью	Начинается после получения сигнала готовности приемников и завершается подтверждением приема данных всеми приемниками	IEC 625-1

соответствии с принятой дисциплиной обслуживания. При обнаружении источника запроса устанавливается сигнал «Занято» и дальнейшая выдача адресов прекращается. После обслуживания данного запроса возобновляется поиск следующего источника. Основным достоинством этого способа селекции является гибкость в реализации дисциплин обслуживания. Практически при использовании программируемой генерации адресов на основе данного способа можно реализовать любую дисциплину обслуживания. Основным недостатком является низкое быстродействие. Данный способ нашел широкое применение в интерфейсе IEC 625-1 (ГОСТ 26.003—80).

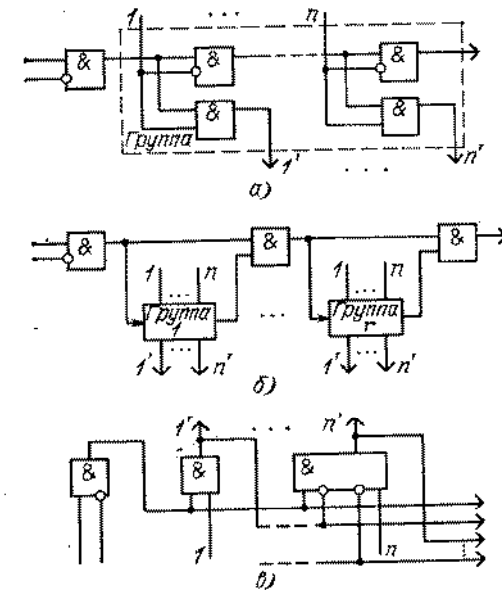
Схема последовательной (цепочечной) селекции, представленная на рис. 5.2,в, широко распространена в машинных интерфейсах как наиболее простая и достаточно быстродействующая. Поиск источника запроса начинается по сигналу «Запрос». Идентификация наиболее приоритетного устройства выполняется сигналом «Подтверждение», который последовательно проходит через все устройства. Приоритетным в данном случае будет устройство, наиболее близко расположенное к контроллеру. При поступлении сигнала «Подтверждение» в устройство (источник запроса) дальнейшее его прохождение блокируется и устройством выставляется сигнал «Занято».

Основными преимуществами последовательного соединения интерфейсных блоков (рис. 5.3,а) является простота реализации и высокое быстродействие по сравнению с адресным сканированием, поскольку выделение приоритетного запроса основывается на задержке логических элементов, объединяемых в разомкнутую (для централизованного варианта) или замкнутую (для децентрализованного варианта) цепь. Повышение быстродействия последовательного соединения может быть осуществлено за счет распараллеливания процесса прохождения сигнала приоритетного сравнения через цепь элементов, что приводит к последовательно-параллельному (рис. 5.3,б) и параллельному (рис. 5.3,в) соединениям. Выигрыш в быстродействии в этих случаях достигается в результате усложнения схемы.

Основным недостатком схем селекции на основе последовательного и последовательно-параллельного соединений является низкая надежность, в особенности при увеличении длины интерфейсных связей. Поэтому последовательное соединение находит основное применение во внутрислужбных интерфейсах.

Аналогично цепочечной схеме функционирует и схема селекции по выделенным линиям (рис. 5.2,г). Отличие ее

Рис. 5.3. Варианты соединения интерфейсных блоков в схемах цепочечной селекции



от предыдущей заключается в том, что общие линии «Запрос» и «Подтверждение» заменяются системой радиальных линий. Максимальное время занятия информационной магистрали для этого варианта будет меньше, чем для цепочечной структуры, так как сигналы по шинам запроса и подтверждения могут передаваться параллельно. Данный способ характеризуется также гибкостью установления дисциплины обслуживания, поскольку контроллер с помощью масок может установить произвольный приоритет и порядок опроса. Однако это достигается за счет существенного увеличения числа линий и усложнения схемотехнического оборудования.

Основные варианты реализации схем селекции децентрализованной структуры представлены на рис. 5.4. Характерным признаком децентрализованной пространственной селекции является наличие замкнутых линий запроса и подтверждения. На рис. 5.4,а показан вариант децентрализованной цепочечной структуры, которая может быть получена из централизованной исключением линии «Занято» и замыканием общей линии «Запрос» с линией «Подтверждение». Необходимым условием установления запроса любым устройством является отсутствие входного сигнала подтверждения. При выдаче запроса этот сигнал «дизъ-

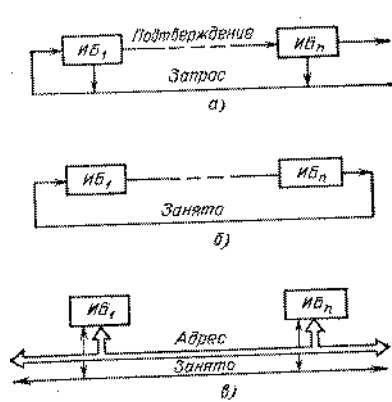


Рис. 5.4. Схемы селекции магистрали децентрализованной структуры.

«конъюнктивно» формируется на линии и трансформируется в сигнал «Подтверждение», который будет проходить до устройства, выставившего запрос и находящегося наиболее близко по отношению к участку замыкания.

На рис. 5.4.б показан вариант кольцевой децентрализованной схемы селекции. В варианте используется одна линия, определяющая состояние занятости информационного канала по циркуляции в линии маркерного импульса или серии импульсов. Устройство, запрашивающее шину, не пропускает маркер к следующему устройству, и, таким образом, циркуляция импульсов прекращается. Способ широко распространен в интерфейсах локальных сетей. Основным недостатком способа является низкая помехоустойчивость.

Одним из наиболее перспективных способов селекции для магистральных систем сопряжения является способ параллельного адресного сравнения или же децентрализованного кодового управления (ДКУ) структурная схема которого представлена на рис. 5.4.в. Сущность алгоритма ДКУ заключается в параллельном выделении приоритетного кода запроса посредством поразрядного сравнения кодов приоритета в асинхронном режиме одновре-

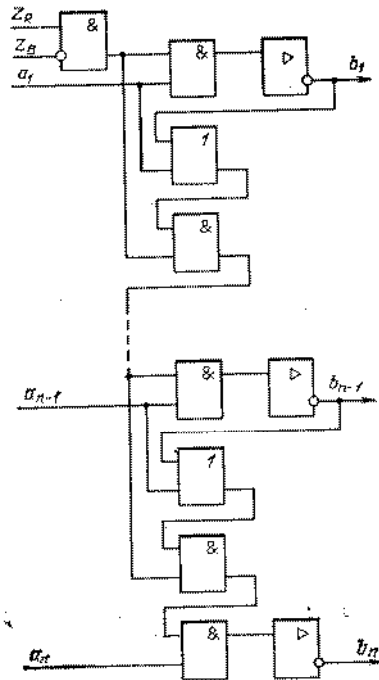


Рис. 5.5. Базовая схема сравнения ДКУ

менно во всех устройствах интерфейса, выставивших запросы. Такое решение использовано, например, в интерфейсных системах Multibus II и Fastbus.

Базовая схема сравнения i -го блока показана на рис. 5.5. Логическая функция сравнения кодов приоритета определяется следующим образом:

$$Z_C = Z_B [(b_n \vee a_{ni} \dots (b_2 a_{2i} (b_1 \vee a_{1i} Z_R)) \dots)],$$

где Z_C — выходной сигнал окончания сравнения; a_{ni} — n -й разряд кода адреса i -го интерфейсного устройства; b_n — n -й разряд шины адреса; Z_R — входной сигнал начала сравнения; Z_B — сигнал запроса.

Несколько схем сравнения функционируют параллельно, а момент их запуска определяется задержками в линиях связи и логических элементах. Фиксация окончания процесса выделения наиболее приоритетного кода может быть выполнена синхронно и асинхронно. Максимальное время выделения приоритетного кода для наихудшего случая при асинхронном способе фиксации окончания переходного процесса

$$\max t \approx 4t_n + (n+m-2)\tau,$$

где t_n — задержка распространения сигнала по интерфейсной линии; n — число разрядов адреса кода запроса; m — число последовательно соединенных логических элементов схемы формирования сигнала окончания сравнения; τ — задержка на одном логическом элементе.

Применение асинхронного способа фиксации окончания сравнения обуславливает необходимость увеличения числа интерфейсных связей и усложнения их структуры, в частности вызывает необходимость использования линий петлевой конфигурации, что является существенным недостатком. Поэтому более целесообразен синхронный способ фиксации.

Анализ возможных вариантов реализации способов селекции устройств на информационной магистрали позволяет выделить следующие операции селекции: иницирование запроса, выделение приоритетного запроса, идентификация запроса.

Иницирование запроса включает в себя процедуры выдачи, хранения и восприятия запроса на организацию процесса взаимодействия. В интервале времени занятия информационного канала сигналы запросов (Z_1, Z_2, \dots, Z_N) от устройств объединяются «дизъюнктивно» на шине запросов или воспринимаются по отдельным линиям и таким образом сохраняются до освобождения информа-

ционного канала. Общий сигнал запроса Z формируется в соответствии с условием $Z = \bigvee_i Z_i$.

Сигналы запроса могут храниться в регистре управляющего блока (радиальная структура шины запроса) или на отдельных триггерах каждого интерфейсного блока (магистральная структура шины запроса).

Функция выделения приоритетного запроса для централизованной структуры (рис. 5.3) описывается логическим выражением

$$Z_i' = Z_B Z_R [Z_i \vee (\bar{Z}_1 Z_2) \vee \dots \vee (\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 \dots Z_j) \vee \dots \vee (\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 \dots \bar{Z}_j Z_n)], \quad (5.1)$$

где Z_B — сигнал занятости информационного канала; Z_R — сигнал разрешения приоритетного сравнения, обычно $Z_R = Z_B$; n — число уровней приоритета; Z_n — сигнал запроса наименьшего приоритета.

Для децентрализованной структуры (рис. 5.5) логическая функция выделения приоритетного запроса записывается следующим образом:

$$Z_i = \bigvee_j^n Z_j [Z_i \vee (\bar{Z}_1 Z_2) \vee \dots \vee (\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 \dots Z_j) \vee \dots \vee (\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 \dots \bar{Z}_j \dots Z_n)]. \quad (5.2)$$

Схемотехническая реализация логических выражений (5.1) и (5.2) может быть выполнена последовательным (рис. 5.3, а), параллельным (рис. 5.3, б) и последовательно-параллельным (рис. 5.3, в) соединениями интерфейсных блоков линией приоритетной выборки.

Идентификация запроса заключается в определении адреса приоритетного источника запроса. Операция выдачи приоритетного кода в зависимости от способа выделения приоритетного запроса выполняется параллельно с операцией выделения приоритетного кода (параллельное сравнение) или же последовательно (в структурах с цепочечным соединением устройств интерфейса). Адреса в интерфейсах могут быть заданы двоичным или позиционным кодом и передаваться по адресной или информационной шине. В машинных интерфейсах получаемая при запросе адресная информация называется *вектором прерывания* и обозначает начальный адрес программы обслуживания прерывания от данного устройства.

Синхронизация определяет согласование процессов взаимодействия между функциональными устройствами

системы. Рассмотрим особенности выполнения процессов взаимодействия составных элементов системы.

Два или более процесса являются *синхронными*, если смены состояний этих процессов взаимонезависимы и выполняются через одинаковые фиксированные интервалы времени. Взаимодействие функциональных устройств при этом рассматривается как совокупность процессов передачи информации источником и приема этой информации одним или несколькими приемниками. Синхронизация процесса взаимодействия заключается в том, что интервал времени смены состояния процесса передачи заведомо не может быть меньше самого длительного интервала времени изменения состояния процесса приема.

Два или более процесса являются *асинхронными*, если смены состояний этих процессов взаимозависимы, а время изменения состояния одного процесса определяется временем смены состояния другого процесса. При асинхронном взаимодействии между процессами передачи и приема существует отношение предшествования.

Реализация асинхронных процессов взаимодействия основывается на принципе обратной связи, которая может быть *однопроводной* и *двухпроводной*. Процессы взаимодействия интерфейсных блоков образуют иерархическую структуру. Уровни иерархии процессов взаимодействия соответствуют иерархии структурных элементов информации, передаваемой между устройствами системы. Процессам взаимодействия различных уровней иерархии соответствуют различные операции синхронизации. Можно выделить три процесса синхронизации передачи: битов слова, слов и массивов слов.

Синхронизация битов слова выполняется при параллельной передаче многоразрядных кодов. Ее необходимость обуславливается переходными процессами установления сигналов в линиях информационного канала из-за разброса параметрических характеристик приемопередающих элементов линий связи. Если известен разброс времени переходного процесса установления сигнала в одной линии информационной шины, то совокупность переходных процессов в каждой линии процесса передачи слова информации по отношению к процессу приема можно представить как совокупность детерминированных процессов. Процесс приема передаваемого слова синхронизируется специальным стробирующим сигналом от источника данных или приемника, выдаваемым с фиксированной задержкой по отношению к моменту выдачи всех разрядов кода слова. Время задержки $\tau = \max\{t_1, t_2\} - \min\{t_1, t_2\}$,

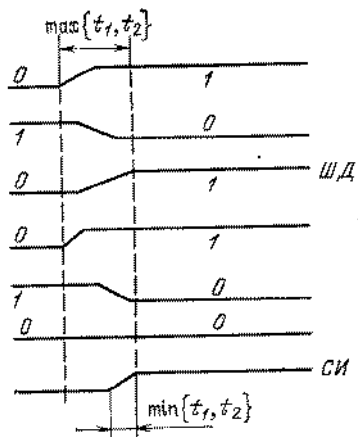


Рис. 5.7. Временная диаграмма синхронизации передачи слов без обратной связи:
ШД — шина данных; СИ — синхронизация источника

← Рис. 5.6. Временная диаграмма синхронизации передачи битов слова:
ШД — шина данных; СИ — синхронизация источника

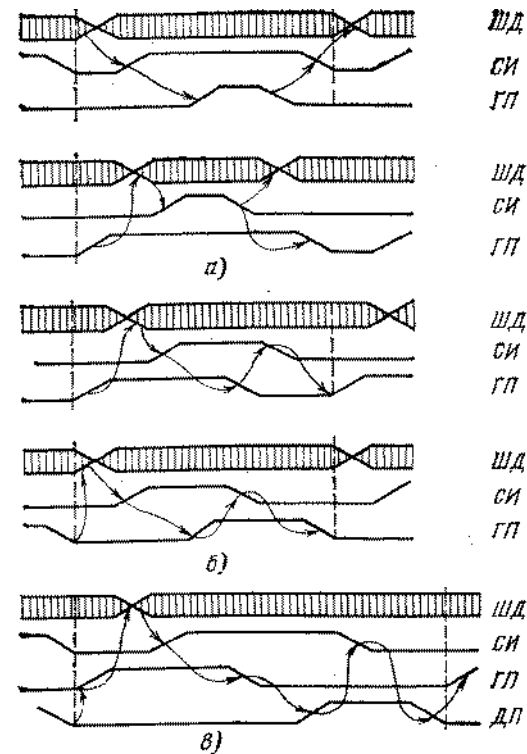
где $\{t_1, t_2\}$ — длительность переходного процесса формирования синхронизирующего импульса (строба) определяется источником информации или внутренним тактирующим генератором приемника (рис. 5.6).

Синхронизация передачи слова определяет такие технические характеристики интерфейса, как возможность взаимодействия одного источника с несколькими приемниками, максимальная скорость передачи и допустимая длина линий связи. На этом уровне используются два основных способа синхронизации передачи: без обратной связи и с обратной связью (рис. 5.7, 5.8).

Схема синхронизации без обратной связи выполняется на основе одного общего или отдельных тактирующих генераторов высокой стабильности. Необходимым условием реализации способа является наличие отдельной линии стробирования. Способ используется в основном в последовательных интерфейсах с побитным принципом передачи. Основным недостатком синхронного способа заключается в том, что скорость выдачи данных источником не может быть больше скорости приема этих данных самым медленнореагирующим приемником. Этот недостаток может быть исключен благодаря применению в интерфейсных блоках модульных буферных ЗУ, например, со стековым механизмом записи и считывания. Учитывая тенденцию снижения стоимости БИС, такое решение в настоящее время экономически эффективно.

Способы технической реализации обратной связи в схемах синхронизации можно разделить: по характеру сиг-

Рис. 5.8. Временные диаграммы синхронизации передачи слов с обратной связью:
ШД — шина данных; СИ — синхронизация источника; ГП — готовность приемника; ДП — данные приняты



налов стробирования и обратной связи на импульсные (рис. 5.8,а) и потенциальные (рис. 5.8,б,в); по числу контуров обратной связи на однопроводные (рис. 5.8,а,б), двухпроводные (рис. 5.8,в).

Применение обратной связи позволяет гибко адаптироваться к изменению скорости передачи информации и наиболее полно использовать пропускную способность информационного канала, который в асинхронном режиме функционирует с быстрым действием, максимальным для каждого устройства системы. Основными недостатками асинхронного способа по сравнению с синхронным являются в ряде случаев более низкая скорость передачи и необходимость введения дополнительных линий обратной связи. Важным качеством синхронизации с обратной связью является возможность одновременной передачи информации от одного источника к нескольким приемникам. Число необходимых линий синхронизации для выполнения данной функции зависит от наличия в устройствах интерфей-

са буферных регистров. При их наличии достаточна *однопроводная обратная связь*. Сигналы синхронизации определяются в соответствии с выражениями

$$СИ = \bigvee_{i=1}^n СИ_i ГП = \prod_{i=1}^m ГП_i, ДП = \prod_{i=1}^m ДП_i,$$

где $СИ_i$ — сигнал стробирования от i -го источника; n — число источников интерфейсной системы; $ГП_i$ — сигнал обратной связи от i -го приемника о готовности приемника к приему; $ДП_i$ — сигнал обратной связи i -го приемника об окончании приема данных; m — число приемников.

При отсутствии буферных регистров используется *двухпроводная обратная связь*. Сигнал на второй линии обратной связи (в данном случае сигнал ДП) выполняет функции сигнализации окончания приема слова данных и формируется аналогично сигналу на линии обратной связи для однопроводного варианта. Подобный способ синхронизации принят в интерфейсе IEC 625-1.

Синхронизация передачи массива слов является процессом синхронизации верхнего уровня. Процессы передачи массива могут быть детерминированными или стохастическими. К детерминированным относятся процессы передачи массива слов фиксированной длины (от одного до нескольких тысяч слов за сеанс связи), к стохастическим — переменной длины. В первом случае используется синхронный принцип сигнализации окончания процесса взаимодействия, во втором — асинхронный.

Синхронный принцип используется редко, причем в основном в интерфейсах, где фиксированная длина массива слов изменяется от 1 до 256 слов, а к интерфейсу предъявляются жесткие требования по числу линий связи. Основным преимуществом способа является отсутствие в системе шин линии окончания сеанса связи.

Асинхронный способ синхронизации передачи массива слов наиболее распространен. Сигналы синхронизации могут быть выданы в произвольный момент времени передачи как приемником, так и источником и переданы по информационной шине или же по специально выделенным линиям управляющего канала.

Функция координации определяет совокупность процедур по организации и контролю процессов взаимодействия устройств системы. Основными операциями координации являются настройка на взаимодействие; контроль взаимодействия; передача функций управления (настройки).

5.4. ПРИНЦИПЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОВМЕСТИМОСТИ ИНТЕРФЕЙСОВ

При создании ВК и ВС на основе мини- и микроЭВМ возникают задачи совместного использования периферийного оборудования и средств обработки информации, входящих на несовместимые или частично совместимые интерфейсы. Такие ситуации возможны: при построении на основе мини-ЭВМ низовых подсистем, имеющих развитую структуру и номенклатуру контрольно-измерительной аппаратуры; при наладке, контроле, испытании и промышленном выпуске сложных контроллеров, дисплейных процессоров, спецпроцессоров; при создании инструментальных систем для разработки проблемно-ориентированного программного обеспечения периферийного оборудования; при подключении к микроЭВМ серийно выпускаемых УСО различного типа, предназначенных для мини-ЭВМ; при построении многомашиных интегрированных систем с использованием мини- и микроЭВМ.

Задача обеспечения совместимости возникает при объединении не только разнотипных, но и однотипных интерфейсов. Отличие заключается в том, что при объединении однотипных интерфейсов связи устройства сопряжения с системами шин объединяемых интерфейсом могут быть симметричны и несимметричны. Для более полного понимания задач обеспечения совмещения введем и рассмотрим понятие симметрии структуры управления интерфейсом и симметрии устройства сопряжения. Структуру управления интерфейсом назовем *симметричной*, если в ней все функции управления полностью распределены по сопрягаемым устройствам, а функции контроллера в определенный момент времени могут выполняться любым устройством. В симметричных структурах все линии могут быть двенаправленными.

В интерфейсах с *несимметричной* (централизованной) структурой управления функции управления сосредоточены только в одном устройстве (контроллере) или же часть этих функций может быть временно передана определенным устройствам, выполняющим в данный момент функции контроллера. В таких системах сопряжения могут быть однонаправленные линии управления. Устройства сопряжения двух однотипных интерфейсов с симметричной структурой управления для любого возможного варианта объединения будут симметричны. Это следует из условия полного распределения функций управления, их децентрализации.

Для несимметричных структур управления возможны два варианта объединения: симметричный и несимметричный. Первый вариант имеет место при объединении двух интерфейсов со стороны только управляемых или только управляющих устройств, второй (несимметричный) — при сопряжении одного (ведущего) интерфейса со стороны управляемого, а второго (ведомого) — со стороны управляющего устройства. В этом случае управляющее устройство второго интерфейса является соподчиненным и рассматривается в первом интерфейсе как управляемое. Входные и выходные связи для этого варианта устройства обеспечения совместимости сопрягаемых интерфейсов будут несимметричными. При обеспечении совместимости разнотипных интерфейсов устройства сопряжения и связи независимо от варианта сопряжения будут несимметричными.

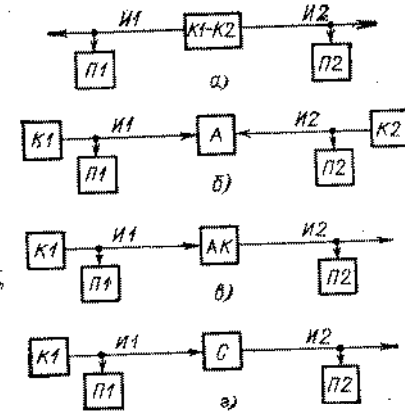
Под *совместимостью интерфейсов* понимается согласованность условий информационной, электрической и конструктивной совместимости этих интерфейсов, чем достигается согласованность взаимодействия устройств, подключенных к различным системам сопряжения. Технически совместимость обычно обеспечивается устройствами, которые в зависимости от структуры, требуемой взаимосвязи могут быть разделены на несколько категорий. Можно выделить два основных признака, по которым определяются эти категории: способ управления сопрягаемыми интерфейсами, способ доступа к сопрягаемым интерфейсам.

На рис. 5.9 показаны возможные варианты обеспечения совместимости сопрягаемых интерфейсов и соответствующие им технические средства.

При объединении двух несимметричных интерфейсов возможна реализация трех способов управления (рис. 5.9): со взаимным соподчинением (рис. 5.9, б), с иерархическим подчинением (рис. 5.9, в, г), с централизованным подчинением (рис. 1.9, а). Примером обеспечения совместимости с взаимным соподчинением является объединение двух одно типных интерфейсов «Общая шина» на основе адаптера межпроцессорной связи типа АМС СМ.

Рис. 5.9. Варианты обеспечения совместимости интерфейсов:

И1, И2 - интерфейсы;
 К1, К2 - контроллеры;
 П1, П2 - периферийное оборудование;
 А - адаптер;
 АК - адаптер- контроллер;
 С - согласователь шин



Это устройство является симметричным и выполняет функции обеспечения попеременного взаимного доступа устройств одной системы сопряжения к ресурсам другой системы. Адаптер АМС СМ является двусторонним коммутатором независимых интерфейсных магистралей, выступающим по отношению к процессорам как УВВ.

Реализация способа иерархического подчинения предполагает подключение ведомого интерфейса к ведущему через контроллер ведомого. Последний для ведущего интерфейса является УВВ, поэтому называется контроллером или адаптером-контроллером. Это устройство совмещает функции адаптера и контроллера и координирует функционирование интерфейсной системы нижнего уровня. Такой способ обеспечения совместимости наиболее часто используется при сопряжении системных интерфейсов «Общая шина», Q-bus, И41 с интерфейсами периферийного оборудования типов САМАС IEC 516, IEC 625-1.

Контроллер выполняет функции взаимодействия с интерфейсом верхнего уровня, которые могут включать в себя прием и интерпретацию команд, преобразование данных и адресов, выделение и обслуживание наиболее приоритетных запросов от непосредственно подчиненных устройств.

При централизованном подчинении универсальный интерфейсный контроллер обеспечивает выход на разнотипные системы сопряжения. Как правило, контроллер имеет буферную память и выполняет функции логического и физического управления интерфейсами. Основными достоинствами способа являются универсальность и гибкость в ис-

Способы доступа к совмещаемым интерфейсам разделяются на косвенные и прямые. Косвенный способ доступа отличается от прямого следующими особенностями: между совмещенными интерфейсами происходит преобразование не только кодовой управляющей информации, передаваемой по информационному каналу, но и сигналов управляющего канала; коды, передаваемые по информационному каналу, подвергаются в адаптере или контроллере буферному запоминанию.

Практически этот способ доступа является основным для несимметричных разнотипных интерфейсов при различных способах управления. Исключение представляет способ управления иерархическим подчинением для однотипных и частично совместимых интерфейсов. В этом случае может быть использован непосредственный доступ к ведущему интерфейсу со стороны ведомого. Устройства, обеспечивающие непосредственный доступ к совмещаемым интерфейсам, получили название *расширителей интерфейсов*. При прямом доступе магистрали информационных каналов совмещаемых интерфейсов имеют непосредственную взаимосвязь без буферных регистров.

Сигналы управляющего канала либо ретранслируются (для однотипных интерфейсов), либо непосредственно логически интерпретируются другой совокупностью управляющих сигналов. Наиболее широко этот способ обеспечения совместимости используется для однотипных машинных интерфейсов. Примером могут служить расширители интерфейсов 2К, «Общая шина». Для разнотипных интерфейсов известны расширители (согласователи) интерфейсов «Общая шина».

Критерий совместимости различных систем сопряжения определяется сложностью интерфейсного адаптера, предназначенного для обеспечения их совместимости. Поскольку адаптер представляет собой логическое устройство и может интерпретироваться автоматной моделью, то можно использовать известные критерии оценки сложности цифровых автоматов. Одним из них является сложность автомата, определяемая числом операторных и условных вершин алгоритма его функционирования. В качестве другого критерия используется объем оборудования, необходимый для реализации адаптера, например в корпусах интегральных схем.

5.5. КРИТЕРИИ ВЫБОРА И ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕРФЕЙСОВ

При разработке нового интерфейса основная задача заключается в выборе принципов организации и

технической реализации информационного и управляющего каналов интерфейса, обеспечивающего наилучшие технико-экономические показатели при его использовании в определенном классе ЭВМ или ВС.

Решение задачи предполагает выбор и обоснование критерия эффективности и методов оптимизации интерфейсов при заданных ограничениях. Исходной информацией для задания множества вариантов интерфейса являются набор G структурных параметров и набор F интерфейсных операторов. Если можно выделить набор Y обобщенных характеристик (критериев эффективности) интерфейса, то взаимосвязь организации и характеристик интерфейса определяется отображением $H: G \times F \rightarrow Y$. При известной целевой функции K задача обоснования выбора в терминах дискретного математического программирования сводится к отысканию экстремума $K = \text{ext}_r \{Y\}$ на множестве Y_0 ограничений. Решение данной задачи сводится к выбору таких вариантов организации $\{G, F\}$, при которых величина K принимает экстремальное значение, а значения обобщенных характеристик Y интерфейса не превышают установленных для них ограничений Y_0 .

Большое число структурных параметров G и сложность их взаимосвязи с характеристиками интерфейса Y являются основными причинами того, что задача выбора в строгой математической постановке становится трудно-разрешимой. Решение задачи упрощается, если ограничить область $\{G, F\}$, что исключает полный перебор вариантов; при этом оценка эффективности разделяется на следующие стадии:

задание множества всех возможных и определение допустимых альтернативных вариантов организации интерфейсов;

выбор критерия эффективности, технико-экономических показателей интерфейсов и соотношений, связывающих значения этих показателей с критерием эффективности;

выявление наиболее рационального на подмножестве допустимых альтернативных вариантов. Наиболее сложным является определение соотношений, связывающих структурные параметры G с обобщенными характеристиками Y и аналитическое выражение характеристик через критерий эффективности.

Структура интерфейса может быть определена размерностью и схемой соединений и топологией связей. Размерность соединений — это число независимых информацион-

ных каналов и степень совмещения во времени процессов информационного взаимодействия в интерфейсе. По размерности и степени совмещения связи разделяются на одномерное, двумерные и т. д. Существующие стандартные интерфейсы в основном имеют одномерную структуру, за исключением некоторых, ориентированных на использование в мультимикропроцессорных системах и сложных ВС.

Схема соединения определяет структуру информационного и управляющего каналов и сводится к параллельному, последовательному и параллельно-последовательному вариантам. Основной характеристикой схемы соединения является степень связности, в соответствии с которой все структуры разделяются на слабосвязные и сильносвязные.

Топология связей характеризует взаимное размещение блоков ЭВМ, ВС и интерфейсных блоков в пространстве. Топология связей зависит от конструктивного размещения плат интерфейсных блоков и разделяется по классам в соответствии с условиями конструктивной совместимости интерфейса на внутриблочную и межблочную.

Функциональная организация интерфейса характеризует способы построения и порядок взаимодействия интерфейсных блоков.

Наиболее детально структура интерфейсов отражается сочетанием математических моделей и языков. Необходимым дополнительным условием эффективного использования средств описания является декомпозиция интерфейса и интерфейсных блоков на функциональные независимые логические схемы, в частности на уровне интерфейсного блока таким логическим схемам соответствуют интерфейсные функции. Интерфейс как система сопряжения состоящая из совокупности интерфейсных блоков, объединенных унифицированным набором линий, может быть также разделен на функционально независимые схемы — интерфейсные операторы.

Набор структурных параметров (размерности, схемы соединения, топологии связей) и интерфейсных операторов (селекции, координации и обмена) позволяет систематизировать возможные варианты интерфейсов.

Следует отметить, что структурные параметры характеризуют информационный канал, а интерфейсные операторы — управляющий. Учитывая это, задание всех возможных вариантов информационного канала выполняется обычным перебором сочетаний структурных параметров. Анализ вариантов управляющего канала определяется возможными сочетаниями интерфейсных операторов

с учетом различных принципов их построения. Выбор структуры информационного канала и принципа функционального построения управляющего канала взаимосвязаны, причем выбор интерфейсных операторов управляющего канала существенно зависит от структуры информационного.

Например, выбор способа реализации оператора синхронизации определяется топологией информационного канала, селекции — размерностью и топологией интерфейса, координации — схемой соединения. Взаимосвязь структурных и функциональных параметров позволяет существенно ограничить перебор благодаря отсеиванию заведомо неприемлемых вариантов, охватывая максимальное число вариантов построения интерфейсов.

Среди технико-экономических показателей интерфейсов можно выделить несколько обобщенных, совокупность которых может дать полную оценку интерфейса. К этим показателям обычно относят пропускную способность, вместимость, стоимость, надежность (время наработки на отказ). Рассмотрим эти характеристики более подробно.

Пропускная способность определяет время передачи единицы информации между устройствами интерфейса. Отличают пропускную способность от физической скорости передачи информации. Пропускная способность зависит от времени, необходимого для установления связи, передачи единицы информации и разъединения связи, а также от длины массива данных, передаваемого за один сеанс связи. Физическая скорость передачи определяется минимальным циклом передачи единицы информации. Увеличение пропускной способности достигается в результате сокращения удельных затрат на установление и разъединение связи, а также повышения физической скорости передачи и увеличения разрядности информационного канала. Эти показатели зависят от схемы соединения, топологии шин, способа реализации операторов селекции и синхронизации.

Вместимость характеризуется максимальным числом устройств, которое может быть подключено к интерфейсу без использования дополнительных средств его расширения. Вместимость зависит от системы адресации интерфейса, нагрузочной способности приемопередающих элементов (ППЭ) и условий конструктивной реализации. Для большинства стандартных интерфейсов эта характеристика определяется вторым фактором. Основными техническими средствами увеличения вместимости являются

Таблица 5.10
Оценка интерфейсов

Характеристика интерфейса	1*	2*	3*	4*	Балл
Уровень стандартизации	Фирменный, отраслевой стандарт				1
	Национальный, государственный стандарт				2
	Международный стандарт				3
Скорость передачи данных, МГц	<0,5	<0,1	<1	<1	1
	0,5...2	0,1...0,5	1...5	1...5	2
	>2	>1	>5	>10	3
Число линий	>60	>40	>70	>4	1
	40...50	30...40	40...60	2...4	2
	<40	<30	<40	<2	3
Длина магистрали, м	<1	<15	<1	<200	1
	1...3	15...30	1...3	200...1000	2
	>10	>30	>5	>1000	3
Вместимость, число устройств	<8	<8	<8	<16	1
	8...16	8...16	16	16...32	2
	>32	>16	>24	>64	3
Структура приоритета	Фиксированная зависимая от размещения				1
	Фиксированная независимая от размещения				2
	Программно изменяемая				3
Число способов селекции, видов адресации	Один				1
	Два				2
	Три				3
Связность	К:1				1
	К:1, 1:1				2
	К:1, 1:1, 1:К				3
Контроль	Отсутствует				1
	Управления и источника питания				2
	Управления, данных и источника питания				3
Средства диагностики и тестовое обеспечение	Отсутствуют				1
	Автономные				2
	В составе операционной системы				3
Тип интерфейсных схем	Малой степени интеграции				1
	Средней степени интеграции				2
	Большой и сверхбольшой степени интеграции				3

Окончание табл. 5.10

Характеристика интерфейса	1*	2*	3*	4*	Балл
Тип интерфейсных разъемов	Прямого контактирования				1
	Косвенного контактирования фирменные				2
	Косвенного контактирования стандартные				3
Тип производства компонентов	Едиичное				1
	Мелкосерийное				2
	Серийное				3

1*- системные 1-процессорных ВС; 2*-периферийного оборудования; 3*- магистрально-модульных мультимикропроцессорных ВС; 4*- распределенных ВС

ретрансляторы сигналов (для межблочных интерфейсов с кодовой выборкой). В случае, если ограничивающим фактором является система адресации, то используется или многократная адресация (для межблочных интерфейсов с кодовой выборкой), или расширители (для внутриблочных интерфейсов с радиальной выборкой). Вместимость тесно взаимосвязана с остальными характеристиками интерфейсов. Ее увеличение вызывает снижение пропускной способности, надежности и повышение стоимости интерфейса. Значения вместимости и других основных показателей интерфейсов приведены в табл.5.1

Точная оценка показателей надежности интерфейса представляет достаточно сложную задачу. Реальная оценка, прогнозирование, а также сравнение по показателям надежности различных вариантов построения интерфейсов могут быть выполнены практически только приближенными методами.

Составные элементы интерфейса для расчета показателей надежности могут быть представлены в виде последовательно-параллельного соединения. Такими элементами являются: контроллер (устройство управления интерфейса); интерфейсные блоки; набор интерфейсных линий; а также блоки питания контроллера и интерфейсных блоков.

При составлении схемы расчета показателей надежности интерфейса необходимо учитывать влияние отказов и сбоев на работоспособность всей системы. Возникающие отказы (сбои) необходимо разделить на отказы (сбои) интерфейса, вызывающие полное и частичное нарушение работоспособности всей системы. Полное нару-

шение работоспособности вызывается отказами следующих составных элементов интерфейса: контроллера (для интерфейса с централизованным управлением); линий связи (общих для всех интерфейсных блоков); цепей элементов интерфейсного блока, формирующих устойчивый ложный сигнал хотя бы на одной из линий интерфейса, общей для всех блоков; блока питания контроллера (для интерфейса с централизованным управлением) и интерфейсных блоков (для варианта, сочетающего децентрализованную топологию и последовательную схему соединения).

Приближенные схемы расчета показателей надежности различных вариантов структурной организации интерфейса и их сравнение показывают, что наибольшей потенциальной надежностью обладает вариант с межблочной топологией, децентрализованным управлением и параллельной схемой соединения.

Основными способами повышения надежности интерфейса являются увеличение размерности, обеспечивающей эффект резервирования, и снижение вероятности отказов, вызывающих полное нарушение работоспособности. Это достигается исключением влияния отказов интерфейсных блоков на состояние линий связи. Существенным образом надежность зависит от вместимости. Например, для системы на базе модулей КАМАК при вместимости 20, 50, 200 время наработки на отказ составляет соответственно 8000, 500 и 80 часов.

Стоимость является одним из основных показателей, определяющих технико-экономическую эффективность интерфейса. Различают начальную стоимость, характеризующую затраты на интерфейс с одним источником и приемником, а также относительную (удельную) стоимость, определяемую затратами на интерфейс в пересчете на один интерфейсный блок. Точный расчет стоимости затрат в большинстве случаев (особенно на системном этапе проектирования) вызывает трудности ввиду того, что стоимость определяется расходами на разработку, изготовление, внедрение и эксплуатацию. Определение стоимости необходимо для сравнительного анализа технико-экономической эффективности интерфейсов. Поэтому в большинстве случаев достаточно приближенной оценки стоимостных затрат, включающих в себя затраты на контроллер, интерфейсные блоки, систему электропитания, конструктивы и кабели связи.

Для распределенных систем и сетей существенную величину составляют затраты на кабели связи, поскольку

стоимость кабелей и их монтажа соизмерима или превышает стоимость остального оборудования интерфейса. Затраты на линии связи в основном определяются суммарной длиной связей, которая, в свою очередь, зависит от пространственного расположения элементов сети. Оценка влияния конфигурации размещения и схемы соединения на суммарную длину кабельных линий обычно выполняется для двух крайних случаев размещения устройств: линейного и плоского. Для упрощения расстояния между соседними элементами принимаются равными, а плоская конфигурация представляется правильной геометрической фигурой.

Расчеты показывают, что для межблочной топологии соединение кольцевой структуры по сравнению с магистральной вызывает увеличение длины кабельных связей почти на 100 %, а для внутриблочной топологии практически не зависит от схемы соединения.

Из сравнения межблочной и внутриблочной топологий в сочетании с различными схемами соединения следует, что наиболее экономичным является вариант параллельного соединения (магистральной структуры) с межблочной топологией.

При решении задачи оценки эффективности интерфейсов в ВС основную сложность представляет выбор обобщенного критерия эффективности. В большинстве случаев в качестве такого критерия принимают некоторые из основных технико-экономических показателей интерфейсов: пропускную способность (производительность); стоимость; надежность. Процесс оценки эффективности принятия решения по выбору приемлемого варианта включает определение аналитической взаимосвязи обобщенных характеристик интерфейсов, количественную оценку показателей и графическое отображение характеристик с последующим сопоставлением полученных результатов. Такая последовательность позволяет получить семейства характеристик для определенных классов интерфейсов, на основе которых разработчик оперативно может выполнять сравнение и выбор соответствующих интерфейсов с учетом требований разрабатываемой ВС. Недостатки подхода заключаются в приближенном характере принимаемого решения, поскольку значимость каждой из сравниваемых характеристик оценивается субъективно, а также в том, что многокритериальный характер оценки эффективности не позволяет принять решение, которое бы математически строго подтверждало его оптимальность.

Другой способ оценки эффективности и выбора интерфейса сводится к приведению многокритериального характера оценки к однокритериальному. Суть способа — в исключении из рассмотрения менее важных, по мнению разработчика, характеристик и в аналитическом выражении основной характеристики (критерия эффективности) через оставшиеся с учетом определенных ограничений. Примером может служить критерий оценки эффективности на основе информативности обмена и информационной производительности интерфейса. Информативность обмена характеризует степень совмещения во времени процессов установления и разъединения связи с процессом передачи данных. Этот показатель позволяет без учета физической скорости передачи данных оценивать эффективность алгоритмов обмена и представляет собой отношение реального времени передачи информационного массива к минимально возможному с учетом полного совмещения во времени фаз взаимодействия. С учетом действительной скорости обмена используется общая и полезная информационные производительности интерфейса, представляющие собой отношения соответственно общего количества единиц информации (данных, адресных, состояния, команд) к минимально возможному времени передачи (при числе информационных сообщений в массиве, равном единице). Аналогично вычисляются соответствующие характеристики с учетом ограничений программного обеспечения ввода-вывода.

Использование этих показателей позволяет определить производительность интерфейса, а также характеризует активность программы ввода-вывода по организации взаимодействия. Данный способ обеспечивает математически точную оценку критерия, однако исключение из рассмотрения ряда показателей делает проблематичной возможность эффективного использования его для всех классов интерфейсов.

Более полно технический уровень интерфейса отражает критерий эффективности интерфейса, получивший название добротности интерфейса Q :

$$Q = \frac{(I + \log_2 A + \log_2 K + F) d}{(T_1 + T_2/M) h}$$

где I — разрядность информационной шины; A — используемое число адресов; K — используемое число команд; F — эквивалентное число команд, которые надо выполнить при реализации эквивалентных аппаратурных функций устройства сопряжения, T_1 — время передачи одного слова; T_2 — дополнительное время обмена, определяемое

интервалами подготовки и завершения операции обмена и идентификации запроса; M — число слов; d — коэффициент, учитывающий ускорение обмена за счет введения режима прямого доступа в память; h — общее число шин интерфейса.

В критерии также учитываются структура системы шин и функциональная организация интерфейса.

В рассмотренных двух способах оценки в качестве основного критерия принимается пропускная способность (производительность, добротность). Более сложным и объективным представляется критерий производительность/стоимость. Производительность определяется средней пропускной способностью контроллера интерфейса (средней интенсивностью обслуживаемого им информационного потока).

Стоимость выражается через затраты на реализацию, которые являются производной функциональной сложности устройств интерфейса. Функциональная сложность устройств представляется количеством информации, описывающей таблицу состояний их автоматных моделей. Значение функциональной сложности может быть выражено через объемы схмотехнического оборудования (число корпусов ИС) и программного обеспечения. Основная трудность способа заключается в определении пропускной способности и функциональной сложности устройств. Кроме того, при оценке не учитываются полностью функциональные возможности, а также другие показатели интерфейса.

Выполнение сравнения и оценки альтернативных вариантов интерфейсов на основе рассмотренных критериев встречает определенные трудности. Это связано с тем, что некоторые показатели невозможно связать аналитическими зависимостями с обобщенными характеристиками интерфейсов, а некоторые вообще не поддаются количественной оценке. К таким показателям относятся: уровень стандартизации, технологичность изготовления, промышленное анонсирование, наличие диагностического обеспечения.

Наиболее приемлемым приближенным способом оценки является сведение задачи многокритериальной оценки к однокритериальной. В качестве критерия эффективности удобен показатель оптимальности, представляющий линейную функцию частных показателей качества.

Основная трудность заключается в определении весовых коэффициентов и в количественной оценке некоторых качественных показателей.

Наиболее приемлемым путем определения весовых коэффициентов является использование стандартного метода экспертных оценок или эвристического прогнозирования. Экспертами могут быть специалисты, разрабатывающие ВС, для которых производится выбор интерфейса, специалисты организаций, внедряющих данные системы, и специалисты, занимающиеся эксплуатацией систем.

В соответствии с областью применения, на которую ориентируется тот или иной интерфейс, формируется соответствующий набор показателей и характеристик (см., например, табл.5.10). Наборы по существу отражают степень соответствия интерфейса требованиям, предъявляемым к ним ЭВМ и системами, на которые интерфейсы ориентированы. Ограничения характеристик определяются достижимым техническим и технологическим уровнем реализации интерфейсов.

В настоящее время целесообразно при оценке обобщенного показателя качества интерфейсов (интерфейсных систем) использовать следующее распределение весов основных и вспомогательных показателей качества (на основе опыта применения методики оценки аналогичных изделий ВТ системы СМ ЭВМ):

- техничко-функциональные 0,5...0,6;
- конструктивно-технологические и эксплуатационные 0,3...0,4;
- стандартизации и унификации, патентно-правовые, эргономические, эстетические 0,1.

Технический уровень оцениваемого интерфейса определяется по отношению к базовому, в качестве которого выбирается интерфейс аналогичного функционального назначения.

Разработка обоснованных методик, устанавливающих порядок выбора и оценки показателей качества интерфейсов, является актуальной и важной задачей, оптимальное решение которой способствует повышению эффективности использования интерфейсов и интерфейсных систем в народном хозяйстве.

5.6. СИСТЕМНЫЕ ИНТЕРФЕЙСЫ МИНИ- И МИКРОЭВМ

Системные (или машинные) интерфейсы предназначены для объединения составных блоков ЭВМ в единую систему. Тенденции развития системных интерфейсов определялись необходимостью существенного увеличения процента операций ввода-вывода, номенклатуры и числа ПУ. В связи с ростом удельного объема интерфейсного оборудования в составе мини- и микроЭВМ ужесточились требования к унификации и стандартизации интерфейсов.

Характерной особенностью системных интерфейсов является возможность интерфейсов функционировать в нескольких режимах взаимодействия, что влияет на функциональный состав систем шин. Основными режимами взаимодействия являются ввод-вывод по программному каналу и по каналу прямого доступа в память (КПД). Традиционно на КПД возлагаются функции разгрузки процессора по передаче информации, а настройка КПД и обработка прерываний УВВ осуществляется под программным управлением процессора. Появление КПД в составе мини-ЭВМ было результатом компромисса между требованием простоты схемного оборудования и желанием повысить производительность ЭВМ за счет совершенствования систем ввода-вывода (СВВ). Совершенствование технологии сделало экономически обоснованным применение в составе мини- и микроЭВМ микропрограммируемых КПД на базе МП.

Интерфейсы микроЭВМ отличаются от интерфейсов мини-ЭВМ прежде всего ограничениями функционального и конструктивного характера. К ним относятся: необходимость минимизации внешних выводов БИС, низкая мощность выходных сигналов, а также упрощение и удешевление самой микроЭВМ. Благодаря высокому уровню интеграции и универсальности составных блоков микроЭВМ обеспечивается минимальная номенклатура блоков. Как правило, это микропроцессор, модули ОЗУ, постоянного запоминающего устройства (ПЗУ) и ввода-вывода со встроенной интерфейсной частью.

В структуре связей микроЭВМ формируется *внутренний интерфейс*, объединяющий БИС процессора, модулей ОЗУ, ПЗУ, управления вводом-выводом, и *внешний интерфейс*, обеспечивающий сопряжение между внутренней шиной и ПУ.

При организации системных интерфейсов микроЭВМ характерна тенденция к минимизации числа шин за счет широкого использования их с разделением времени (мультиплексирование). Наиболее часто совмещаются линии адреса и данных, уменьшается число шин приоритетной выборки и упрощается процедура селекции.

Основными показателями СВВ и системных интерфейсов являются: тип и число КПД; возможность непосредственного обмена данными между ПУ, минуя процессор; число уровней приоритета; возможности системы адресации; максимальная скорость передачи; время идентификации источника запроса; число линий в системе шин.

Интерфейсы микроЭВМ PDP-11

Интерфейсы PDP-11 представляют совокупность совместимых и частично совместимых магистралей, предназначенных для рационального построения мини- и микроЭВМ (табл. 5.11). Основу всех модификаций интерфейсов данной группы составил интерфейс Unibus.

Аналогичный интерфейс «Общая шина» положен в основу системного интерфейса СМ ЭВМ и других мини-ЭВМ.

Совмещение информационных магистралей ОЗУ и ввода-вывода позволило максимально унифицировать внут-

Таблица 5.11

Оценка интерфейсов ЭВМ с общей шиной

Характеристика интерфейса	Мини-ЭВМ	МикроЭВМ	Персональные ЭВМ
Число функциональных линий (Ст./Доп.)	56/60	34/46	46
Разрядность данных, бит	16	16	16
Разрядность шин адреса (Ст./Доп.)	18/22	18/22, М	22, М
Число линий управления	22	16	24
Число уровней приоритетов (Ст./Доп.)	5	2/5	3
Арбитраж приоритетов ПУ	Централизованный цепочечный	Централизованный цепочечный	Централизованный радиальный
Управление режимом ЦДП	Распределенное	Распределенное	Централизованное
Система адресации ПУ	Логическая	Логическая	Географическая и логическая
Идентификация наличия модуля	Отсутствует	Отсутствует	Имеется
Число подключаемых устройств	18	15	8
Длина магистрали, м	20	1	0,5
Минимальное время цикла, мкс	0,4	0,5	0,5

Примечания: Доп. — допустимое; М — мультиплексируемые; Ст. — стандартное

ренние связи ЭВМ, а также внесло качественно новые особенности в архитектуру ЭВМ и расширило схемотехнические возможности использования ЭВМ. Широкое внедрение интерфейса объясняется рядом следующих особенностей, принципиально отличающих его организацию от организации традиционных интерфейсов мини-ЭВМ первого поколения.

Общая система адресации ПУ и ОЗУ теоретически позволяет подключать значительно большее число устройств, чем в ЭВМ двухуровневой структуры, а также обрабатывать содержимое регистров ПУ с помощью адресных команд обращения в память, что исключает необходимость специальных команд ввода-вывода.

Общая система синхронизации асинхронного типа и возможность адресации со стороны ПУ позволяют подключать к процессору модули ОЗУ, ПУ различного быстродействия и производить обмен информацией между ОЗУ и ПУ по КПД, минуя ОЗУ и совмещая выполнение операций в процессоре. Режим прямого доступа к памяти обеспечивается контроллерами ПУ со встроенными КПД, при этом не исключается возможность децентрализованного обмена информацией между двумя ПУ (например, при перезаписи файлов на ВЗУ).

Реализация системы шины на основе приемопередающих элементов с открытым коллектором и кабельных соединений (в пределах 20 м) частично решает проблему расстояния и позволяет создавать двух- и многомашинные ВС, ВС, имеющие широкие функциональные возможности по резервированию ЭВМ и коллективному использованию несколькими процессорами наиболее дорогостоящих ПУ.

Однако данному системному интерфейсу свойственны следующие недостатки. Необходимость динамического перераспределения информационной магистрали между процессором и ПУ по принципу «здатчик-исполнитель» увеличивает общее время установления связи. Поэтому в мини-ЭВМ с интерфейсом «Общая шина» время реакции на прерывание несколько увеличивается. Увеличение длины и унификация связей интерфейса снижают надежность ЭВМ в целом, так как любое короткое замыкание или обрыв одной из линий вызывает отказ всей системы. Более сложна и техническая реализация интерфейсных модулей.

Системные интерфейсы мини-ЭВМ. Интерфейс «Общая шина» в ранних 16-разрядных мини-ЭВМ и в современных 16-разрядных многоплатных ЭВМ выполняет роль магистрали ввода-вывода для всех типов периферийного оборудования.

В высокопроизводительных 16-разрядных мини-ЭВМ (типа PDP-11/70) «Общая шина» выполняет роль магистрали ввода-вывода для ПУ малой и средней производительности. Для подключения контроллеров высокопроизводительных ВЗУ используют специализированную магистраль типа Massbus, содержащую 32-разрядную шину данных, связанную через соответствующий адаптер с оперативной памятью.

Указанные особенности реализации системных магистралей мини-ЭВМ не обеспечивают их стандартизацию на уровне национальных стандартов. Кроме того, существенным ограничением на более широкое их применение является отсутствие в системных интерфейсах средств обеспечения режима мультипроцессорности. Это в такой же степени относится к магистралям микро- и персональных ЭВМ.

Системный интерфейс микроЭВМ. В интерфейсе используется частичное мультиплексирование шин адреса и данных в целях уменьшения числа линий для реализации магистрали в БИС, корпус которой имеет 40 выводов.

В магистрали Q-bus микроЭВМ на базе LSI-11/02 используют 16 двунаправленных линий, мультиплексируемых во времени относительно адресов и данных. Передачи по ним упорядочиваются с помощью управляющих линий, обеспечивающих идентификацию и направление обмена по информационным шинам, различение передачи слова и байта данных, синхронизацию обмена. Аналогичный интерфейс используется в ряде отечественных 16-разрядных микроЭВМ.

Для упрощения СВВ применяется специальный сигнал, идентифицирующий область адресов ПУ. Одноуровневая система управления прерываниями и операциями прямого доступа к памяти построена по цепочечной схеме. Три сигнала используются для установки системы в исходное состояние при включении/выключении питания. Дополнительные три линии выполняют системные функции для: прекращения эмуляции PDP-11 и перехода в режим работы с пульта, перезаписи микрокода в динамической памяти, операций в реальном масштабе времени.

Развитие системного интерфейса Q-bus связано с созданием микроЭВМ общего назначения на базе МП, сравнимых по возможностям и производительности с процессорами мини-ЭВМ (например, LSI-11/23 с PDP-11/40 и J-11 с PDP-11/70). Это потребовало расширения разрядности адресных линий до 22 и использования более раз-

витой подшины управления прерываниями, применяемой в системной магистрали мини-ЭВМ.

Системный интерфейс персональных ЭВМ. При выборе системного интерфейса и периферийного оборудования персональных ЭВМ принимают во внимание главным образом требования обеспечения максимальной легкости подключения и отключения ПУ при минимальной стоимости за счет отказа от совместимости с соответствующими контроллерами ПУ микроЭВМ системы PDP-11.

Основная панель ЭВМ моделей 325 и 350 реализует новые принципы конструктивной простоты выполнения интерфейса. Это обеспечивает возможность установки отдельных модулей в любое посадочное место (благодаря исключению главным образом объемных переключателей на монтажной панели и переключателей).

Интерфейс этих моделей в отличие от интерфейсов мини-ЭВМ и Q-bus ранних микроЭВМ использует мультиплексирование 22-разрядных адресов и 16-разрядных данных. Шина рассчитана на применение недорогих приемопередатчиков с тремя состояниями (восемь в корпусе). Это обеспечивает более экономичное подключение к шине и улучшение электрических параметров линий шины при уменьшении числа посадочных мест до восьми. Специальные средства доступа к шине исключают конфликтные ситуации между двумя одновременно работающими передатчиками. Использование строб-сигналов «разрешение задатчика» и «разрешение исполнителя» позволяет задатчику управлять работой приемопередатчиков во время чтения шины таким образом, чтобы информация передавалась от исполнителя только в нужном направлении по адресу, указанному задатчиком. Это исключает потерю данных из-за импульсных помех от источника питания в момент переключения приемопередатчиков шины. Синхронизация операций прямого доступа к памяти осуществляется системным модулем.

Базовые функциональные компоненты (центральный процессор (ЦП), основное ОЗУ емкостью 256К байт, ПЗУ, содержащее программы диагностики и инициализации, энергозависимое ОЗУ с синхронизатором, контроллеры АЦПУ, асинхронной и синхронной линий связи) подключаются к внутренней секции интерфейса. Компоненты расширения моделей (массовая сменная и дополнительная памяти на гибких дисках и типа «винчестер» и другие модули) подсоединяются к дополнительной секции интерфейса, связанной с основной через соответствующий буфер. Подключение основных контроллеров ПУ и ОЗУ к

внутренней секции интерфейса позволяет получить более высокие скорости передачи данных, а также экономию технических средств и физического объема.

Три линии приоритета 2, 1, 0 (в порядке убывания) обеспечивают управление интерфейсом. Устройство более высокого приоритета, имеющее запрос на обращение к интерфейсу, получает управление шиной только по завершении передачи данных устройством с наивысшим текущим приоритетом. Дополнительную гибкость обеспечивает независимость приоритетов прерываний и прямого доступа к памяти от положения модулей в основной панели, что упрощает подключение кабелей ПУ.

Еще одним преимуществом является используемая система назначения фиксированных адресов посадочным местам (географическая адресация). Для каждого из восьми физических гнезд резервируется один 128-байтовый сегмент страницы ввода-вывода. Дешифратор адресов располагается на основной плате модели. Он вырабатывает сигнал выборки модуля в адресной части цикла. Семь младших разрядов адреса дешифрируются в модуле для идентификации одного из 128 байтов, к которому производится обращение.

Каждый дополнительный модуль идентифицирует свое наличие индивидуальным сигналом. Сигнал посылается в системный модуль при включении питания и фиксируется в виде бита в соответствующей ячейке памяти страницы ввода-вывода. Диагностическая программа, хранящаяся в ПЗУ системного модуля, анализирует значения разрядов этого регистра, определяя размещение дополнительных модулей.

Каждый раз при включении питания предусмотрена полная проверка целостности структуры, работоспособности всех функциональных узлов модели и установленных дополнительных модулей. В случае обнаружения ошибок выдаются сообщения на графический дисплей терминала, а также индицируются ошибки на системном модуле.

Для обеспечения одинаковой реализации сопряжения большого числа различных УВВ в СМ ЭВМ принят базовый интерфейс ИРПР (интерфейс радиальный параллельный).

Таким образом, интерфейс ИРПР относится к двухуровневым малым интерфейсам. На первом уровне унифицируются основной алгоритм обмена информацией и физическая реализация взаимодействия (2-й уровень - для конкретного типа УВВ). Международным аналогом ИРПР является широко распространенный интерфейс BS 4421.

Описание ИРПР содержит технические требования и функциональные характеристики. Функциональные характеристики основаны на следующих принципах: метод передачи данных между источником (И) и приемником (П) не зависит от типа устройства; на передаваемые данные не накладывается никаких ограничений; используется минимальное число сигналов управления и состояния.

Передача данных осуществляется между одним источником и одним приемником. Для дуплексного режима обмена требуется два сопряжения. Набор линий (сигналов) сопряжения, разделенных на три группы (заземления, управления, сигнальные), приведен в табл. 5.12.

Линия Э служит для защиты от помех сигналов управления и передаваемых данных. Линия соединяется с металлическим корпусом устройства, подключенным к общей земле, накоротко или через сопротивление 100 Ом. Линия ОВ подсоединяется к точке, принятой в данном устройстве

Таблица 5.12

Линии интерфейса ИРПР

Наименование	Обозначение		Направление
	русское	международное	
<i>Линии заземления</i>			
Экран	Э	S	Пассивная линия
Нуль	ОВ	Z	То же
<i>Линии управления</i>			
Готовность источника	ГИ	SO	От И к П
Готовность приемника	ГП	AO	От П к И
Сроч источник	СТР	SC	От И к П
Запрос приемника	ЗП	AC	От П к И
<i>Линии сигнальные</i>			
Данные (2 ⁰ ...2 ⁷)	D0...D7	D0...D7	От И к П
Контрольный разряд младшего байта*	KP0	DP0	От И к П
Данные (2 ⁸ ...2 ¹⁵)	D8...D15	D8...D15	От И к П
Контрольный разряд старшего байта*	KP1	DP1	От И к П
Состояние приемника	СП1...СП8	A1...A8	От П к И
Состояние источника	СИ1...СИ8	S1...S8	От И к П

* -необязательные линии

за нулевую и изолированной от металлического корпуса. Необходимо обеспечить возможность подключения линии к металлическому корпусу.

Линии ИИ и ГП используются для передачи наиболее важной информации о рабочем состоянии устройства («лог. 1»). Правильная интерпретация нерабочего состояния («лог. 0») обеспечивается в случае, если сигнал СТР имеет значение «лог. 0». При этом выходное рабочее состояние не должно зависеть от входного сигнала.

Линии СТР и ЗП используются для передачи сигналов обмена информацией между И и П по принципу «запрос-ответ». При этом не накладывается никаких ограничений на оба устройства.

Для источника возможны два способа работы: совмещенные подготовки информации с переходом значений сигналов СТР и ЗП в «лог. 0»; подготовка новой информации с момента установки сигнала ЗП в состояние «лог. 1». При первом способе обеспечивается более высокая скорость передачи данных. Второй способ гарантирует правильность передачи информации и используется процессором при работе с приемником данных. Устройство, принимающее сигналы, должно компенсировать разницу в задержке принимаемых сигналов.

Линии данных используются для передачи до 16 разрядов данных от источника. Контрольные разряды КР0 и КР1 устанавливаются такими, чтобы сумма единиц в соответствующем байте данных была нечетной.

Сигналы СИ выдаются аналогично сигналам данных. Сигналы СП действительны в случае, когда на линии ЗП — значение «лог. 1», а на линии СТР — «лог. 0». В технически обоснованных случаях допускаются асинхронные сигналы СИ и СП.

Тип и требования к физической реализации и назначение контактов разъема для выхода на ИРПР регламентируются и уточняются в ТУ на устройство. Интерфейсный кабель должен иметь волновое сопротивление 110 ± 20 Ом.

Уровни сигналов усилителей-передатчиков и усилителей-приемников должны соответствовать уровням для ИМС типа ТТЛ. В качестве передатчика должна применяться ИМС с открытым коллекторным выходом с допустимым током нагрузки не менее 40 мА. Входной ток приемника не более 1,6 мА.

Интерфейс ИРПС (для радиального подключения устройств с последовательной передачей информации) обеспечивает единые способы обмена информацией для различных УВВ (стартстопных, с буфером или без буфера) при работе с контроллером (К), при непосредственном соединении двух УВВ или двух контроллеров.

Подключение УВВ осуществляется радиально посредством кабеля. Использование в качестве соединительных линий выделенных пар в многожильных телефонных кабелях допускается только при наличии специального разрешения.

Интерфейс ИРПС позволяет осуществлять асинхронную передачу постоянным током (токовая петля) по 4-проводной дуплексной связи (рис.5.10). В технически обоснованных случаях допустима и цепь взаимосвязи, указывающая состояние УВВ. Взаимосвязью называется соединение между контроллером и УВВ. Задача взаимосвязи — передача последовательных двоичных сигналов с регулярной скоростью, определяемой стандартом или соглашениями.

Цепи взаимосвязи приведены в табл.5.13 Знаками «+» и «—» обозначено направление тока в петле. Сигналы в цепи 1 (передаваемые данные) возникают в источнике и проходят к приемнику. Цепи 1 и 2 в интервале между передаваемыми знаками или словами находятся в состоянии 1. Состояние 1 или 0 должно удерживаться в течение всей длительности сигнала. В случае, если устройство предназначено только для приема, цепь 1 остается разомкнутой. Цепь 3 в состоянии 1 указывает готовность приемника (УВВ), а в состоянии 0 — что приемник не готов принять новую информацию.

Формат передаваемой информации (в разрядах) следующий (рис.5.11): старт; передаваемые данные — 5, 7 или 8; четность — 1 или отсутствует; стоп — 1, 1,5 или 2.

Цепи взаимосвязи реализованы так, чтобы они питались током от передатчика (активный режим). Допускается питание от приемника (пассивный режим). Для двух вариантов ИРПС имеем:

	Состояние	Ток, мА
40-миллиамперная токовая петля	1	30...50
	0	10...5
20-миллиамперная токовая петля	1	15...25
	0	0...3

Любая схема на приемной стороне рассчитана на исключение повреждения при замыкании проводников в цепи взаимосвязи.

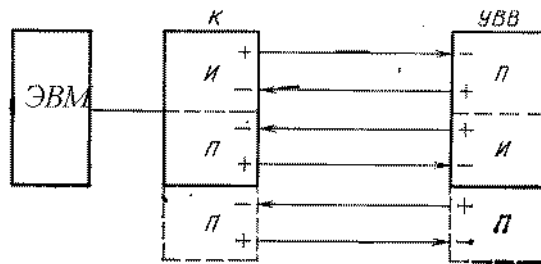


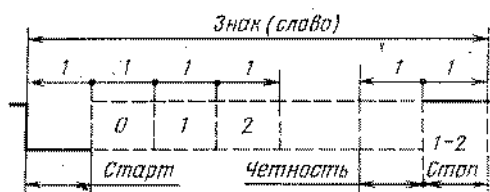
Рис. 5.10. Схема обмена в ИРПС: И - источник, П - приёмник, К - контроллер, УВВ - устройство ввода-вывода

Таблица 5.13

Цепи интерфейса ИРПС

Номер цепи	Наименование	Обозначение	Направление передачи
1	Передаваемые данные	ПД+	От И к П
		ПД-	От П к И
2	Принимаемые данные	ПрД+	От П к И
		ПрД-	От И к П
3	Готовность приемника (необязательная цепь)	ГП+	От П к И
		ГП-	От И к П

Рис. 5.11. Формат информации, передаваемой по ИРПС



Соединяемые оконечные устройства (К и УВВ) имеют взаимное гальванически разделенное электрическое заземление. Гальваническое разделение осуществляется всегда с той стороны цепи взаимосвязи, которая не питается током. Номинальное значение изоляционного напряжения гальванического разделения равно 500 В.

Максимальная длительность фронтов сигналов в конце линии, нагруженной на характеристическое сопротивление, не должна превышать 50 мкс. Цепи взаимосвязи должны обеспечивать передачу сигналов со скоростью 9600 бит/с на

расстояние от 0 до 500 м. При передаче на большие расстояния пропорционально понижается скорость передачи. Сигналы взаимосвязи должны приближаться к прямоугольной форме.

Схема источника сигнального тока выполняется так, чтобы отключение нагрузки, короткое замыкание выходных зажимов или одного из них на землю не приводило к ее повреждению. Крутизна фронтов сигналов, измеряемых на зажимах передатчика, нагруженного сопротивлением 100 Ом, не более 1 мкс.

Любое включение на приемной стороне (приемник) выполняется так, чтобы при длительной нагрузке максимально допустимым током цепи взаимосвязи не приводило к повреждению приемника. Падение напряжения, измеряемое на входных зажимах приемника, при состоянии 1 в цепи взаимосвязи не менее 5 В для телетайпа и 2,5 В для других устройств. Входная емкость приемника не более 10 нФ. Приемник должен работать независимо от крутизны фронтов в диапазоне 0...50 мкс.

Двухпроводная линия в цепи взаимосвязи выполняется витой парой. Типы применяемых разъемов и кабеля не регламентируются, по своим параметрам должны удовлетворять вышеприведенным требованиям.

5.7. ИНТЕРФЕЙСЫ ПРОГРАММНО-МОДУЛЬНЫХ ПЕРИФЕРИЙНЫХ ПОДСИСТЕМ

В системах, содержащих большое количество периферийного оборудования широкой номенклатуры, контроллеры подсоединяются с помощью внутрислотовых и межслотовых интерфейсов типов ОШ, 2К, И41 СМ ЭВМ и с помощью *устройств независимых магистральных интерфейсов*. Последние обеспечивают экономичное построение СВВ различной конфигурации и сложности, существенно сокращая сроки и стоимость создания систем средней и большой производительности.

Современные требования унификации компонентов периферийного оборудования связи с объектом обеспечили стандартизацию на международном уровне ряда таких интерфейсов, в основном ориентированных на применение в измерительных системах различного назначения. В первую очередь — это внутрислотовый и межслотовый интерфейсы САМАС (IEC 516 и IEC 552), интерфейс IEC 625-1, широко используемый в современных системах в качестве межслотового и в последнее время в качестве внутрислотового.

Наибольшее значение на современном этапе развития ВС имеют стандартные интерфейсы магистрального подключения, оптимизированные для периферийного оборудования с малой и средней скоростью передачи и средней производительности. Интерфейсы должны обеспечивать одновременную работу различных функциональных групп ПУ без ограничения производительности ВС.

Интерфейс должен обеспечивать: одновременную работу ПУ и передачу блоков и отдельных слов данных; подсоединение и работу ПУ, имеющих 1- и 2-байтовые каналы данных; функционально и электрически подсоединение до 16 ПУ; как минимум, адекватное обнаружение и сообщение ошибок по данным, адресам, командам и информации состояния, а также передачу операционной системе условий их возникновения с целью минимизации времени, требуемого для диагностики и локализации ошибок.

Не требуются идентификация передачи блоков, переключение контроллеров ввода-вывода между каналами, наличие цепочки команд и средств измерения времени работы ПУ.

Интерфейс не должен генерировать ошибки интерфейса при включении или выключении питания на ПУ, а также при переключении их режимов работы, таких как включено/выключено, готов/не готов, занято/не занято, дистанционное/местное и т. д.

Интерфейс должен: обладать способностью сбрасываться вне зависимости от состояния подключенного оборудования и сигнализировать, что специфичное оборудование будет сброшено; быть «прозрачным» для передаваемых данных и определять порядок расположения разрядов на линиях данных; обеспечивать и определять методы для представления от ПУ информации состояния ПУ (не детализируется обобщенное состояние или индикация); обеспечивать первичную адресацию от 16 до 64 ПУ (вторичная адресация зависит от ПУ и не должна быть частью спецификации интерфейса).

Интерфейс должен обеспечивать передачу информации в режиме запрос/ответ и работать в полудуплексном режиме. Временные соотношения должны быть определены для минимального и максимального времени ответа, связанного с интерфейсной логикой.

Разрядность канала данных должна быть один или два 8-разрядных байта плюс разряд четности в каждом байте.

Интерфейс должен иметь средства: для различения ПУ, одновременно выставивших запросы; для немедленного прекращения операции в любом ПУ, работающем в ненормальных условиях; для различения передачи адресов, команд, состояний и данных, а также иметь список устройств независимых команд и состояний и команд, зарезервированных для конкретных ПУ.

Длина кабеля между ВС и подключенными ПУ должна быть до 30 м, но при этом не требуется максимальной скорости передачи данных. Максимальное быстродействие должно быть не менее 1 МГц, но не при длине кабеля в 30 м.

Необходимо наличие средств обнаружения несуществующих или неработающих ПУ.

Для известного интерфейса IES-625-1 нет ограничений на конструктивную реализацию и способы построения устройств, а также способы объединения их в систему. Стандарт определяет только магистраль, по которой осуществляются обмен информацией, синхронизация и управление. Магистраль является полностью пассивной. Все активные цепи, по которым вырабатывают управляющую информацию и осуществляют прием и передачу информации, размещаются на печатных платах устройств.

5.8. ИНТЕРФЕЙСЫ ЛОКАЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Локальные сети мини- и микроЭВМ представляют собой наиболее эффективную форму коллективного использования средств ВТ. Это обусловлено: высокоскоростной передающей средой (порядка 10 Мбит/с); высокой надежностью передачи (вероятность ошибок порядка 10^{-12}); специализацией процессоров ЛС (рабочие, управляющие, обработки файлов, регистрации и т. д.); полностью связностью узлов сети (в рамках одного кольца, одного сегмента и т. д.).

В целом ЛС занимают промежуточное положение между сетями ЭВМ и каналами ввода-вывода сосредоточенных ВС, отличаясь от первых существенно большим быстродействием, а от вторых — значительно более высокой надежностью. Кроме того, ЛС обеспечивают подключение разнотипных процессоров и периферийных устройств.

Особое значение ЛС получили в связи с развитием и внедрением персональных ЭВМ. Это привело к выделению специального класса ЛС — сети персональных ЭВМ. При этом следует учитывать, что ЛС могут выходить через специальные устройства на другие ЛС и на глобальные сети, что еще более повышает эффективность такой формы организации ВС.

В настоящее время ЛС находят самое широкое применение в системах автоматизации, и в основном в управлении сложными быстропротекающими процессами сбора и обработки данных от распределенных научно-технических объектов большой протяженности.

В современных ЛС существенно используются МП, поэтому их также называют локальными микропроцессорными вычислительными сетями (ЛМВС).

Базовыми элементами ЛС являются передающая среда, механизм управления передачей данных, сетевой интерфейс для подключения обрабатывающих ЭВМ и устройств к ЛС.

По значению соотношений стоимость/производительность ЛС можно разделить на три крупные категории:

- низкая стоимость, низкая производительность: такие ЛС в основном используют в качестве среды передачи данных витые пары проводов, обеспечивающие скорости передачи от 240 кбит/с до 2 Мбит/с;
- средняя стоимость, средняя производительность: ЛС такого типа реализуются на основе коаксиальных кабелей, обеспечивающих скорость передачи от 800 кбит/с до 10 Мбит/с;
- высокая стоимость, высокая производительность: подобные ЛС обеспечивают скорости передачи от 2 до 20 Мбит/с.

Наиболее широко используются следующие конфигурации ЛС: звезда, шина, кольцо, дерево. Результаты качественного сравнения различных топологий ЛС приведены в табл. 5.14, а применяемых в ЛС физических сред передачи — в табл. 5.15.

Механизм управления (метод) доступом существенно влияет на качество функционирования ЛС. Можно выделить детерминированные, случайные и комбинированные механизмы.

Таблица 5.14

Сравнение топологий ЛС

Характеристика ЛС	Кольцо	Шина	Звезда	Дерево
Стоимость подсоединения	Низкая	Низкая	Низкая	Выше средней
Сложность функций управления потоком данных	Выше средней	Низкая	Выше средней	Низкая
Возможность расширения	Выше средней	Низкая	Ниже средней	Низкая
Возможность настройки для конкретного применения	Ниже средней	Высокая	Выше средней	Очень высокая

Таблица 5.15

Сравнение сред передачи ЛС

Характеристика ЛС	Скрученная пара	Коаксиальный кабель	Широкополосный коаксиальный кабель	Волоконная линия
Скорость передачи, Мбит/с	До 1	10...50	300...400	Не ограничена
Доступность устройств	Широкая	Ограниченная	Широкая	Очень ограниченная
Стоимость устройства	Очень низкая	Ниже средней	Ниже средней	Очень высокая
Возможность подсоединения	Ограниченная	Ограниченная	Ограниченная	Широкая
Стоимость кабеля (1 м), относительная	1	10	25	50
Число узлов на линии	Десятки	Десятки—сотни	Сотни	Две (точка-точка) и более
Отношение сигнал/шум	Малое	Среднее	Среднее	Большое
Расстояние для передачи, км	0,01...0,1	2,5	300	Сотни

Основные характеристики ЛС: удаленность друг от друга абонентов (обычно менее 2,5 км); топология (обычно общая шина, кольцо); среда передачи; режим функционирования (синхронный или асинхронный); максимальная скорость передачи данных; характер передачи данных (трафик), на обслуживание которого ориентирована ЛС (равномерный или спорадический); максимальное число узлов в ЛС; максимальное расстояние между узлами; требования к задержкам доставки сообщений (ограничена, постоянна, не ограничена, случайна); механизм управления доступом к среде (опрос, CSMA/CD, маркерный доступ); используемые протоколы и их идентичность модели АСОС; обслуживаемость ЛС; возможность тестирования ЛС и обнаружения/коррекции ошибок; уровень надежности.

Стандартизация ЛС протекает в условиях существования базовой модели архитектуры соединения открытых систем АСОС. Следует учитывать, что Европейская ассоциация производителей ЭВМ (ЕСМА) выделяет и считает достаточными для ЛС только четыре нижних уровня модели АСОС.

Рассмотрим особенности компонентов архитектуры ЛС. Логическая структура ЛС принципиально не отличается от логической структуры любой другой сети. В силу физической полновязанности ЛС (на кольце или сегменте шины) из функций ЛС исключается решение задачи маршрутизации и вводятся специальные подсистемы информационно-вычислительного обслуживания (файловые, печати и т. д.).

Протоколы и процедуры ЛС на канальном уровне реализуются аппаратными или микропрограммными средствами для обеспечения требуемых временных характеристик. В большинстве случаев протоколы уровней выше канального реализуются в ЛС программно. Тем не менее имеется тенденция к снижению объема программных реализаций за счет использования микропрограммируемых контроллеров связи.

Среди множества реализаций ЛС выделяют следующие основные типы: кольцевая с маркерным управлением доступом, кольцевая с тактируемым доступом, общая шина со случайным доступом и общая шина с упорядоченным доступом [29, 47].

В кольцевых ЛС с маркерным управлением доступом абонента (станции) к каналу передачи возможен в том случае, если станция имеет специальное разрешение или, иными словами, получила маркер, который, в свою очередь, перемещается по кольцу. В начале работы некоторая станция генерирует свободный маркер, который, двигаясь по кольцу, попадает в готовую передать пакет станцию, где его состояние меняется на занятое. Станция передает пакет по кольцу, после чего удаляет его из обращения и вырабатывает новый свободный маркер, который отправляется соседней по кольцу станции, где повторяется описанный цикл операций.

Одной из особенностей рассматриваемого типа ЛС является то, что при достаточно больших длинах пакетов и задержках распространения в кольце могут находиться сразу несколько маркеров. Из соображений надежности и устойчивости работы ЛС часто ограничивают число маркеров одним. Это выполняется при следующих условиях: передающая станция вырабатывает свободный маркер только после либо полной передачи пакета по кольцу, либо получения собственного маркера.

В кольцевых сетях с тактируемым доступом постоянное число тактов фиксированной длительности непрерывно «циркулирует» по кольцу. Под тактом понимается некоторый пакет-контейнер, в который может быть помещен пакет данных, если индикатор заголовка контейнера соответствует состоянию «Свободен». После занятия такта пакетом от какой-нибудь станции индикатор устанавливается в состояние «Занят» и пакет начинает передаваться по кольцу. Когда этот пакет достигнет станции-отправителя (пройдя по кольцу полный цикл, он побывав и в станции-получателе), индикатор заголовка устанавливается в состояние «Свободен», а сам такт предоставляется соседней станции, несмотря на возможное наличие переданных пакетов у станции-отправителя. Между двумя последовательными захватами канала какой-либо станцией этот пакет совершает оборот по кольцу в состоянии «Свободен».

В общей шине со случайным доступом наиболее распространенным является метод CSMA/CD (множественный доступ с контролем несущей и обнаружением столкновений). Каждая станция, ожидающая передачи пакета, «прислушивается» к шине для определения состояния ее занятости. В том случае, когда шина свободна, станция захватывает шину и передает по ней пакет; при занятости шины попытка передать пакет откладывается до окончания текущей передачи. Способность систем со случайным доступом учитывать состояние шин отражается в названии метода.

При данном методе возможно создание ситуаций, когда несколько станций одновременно начинают передачу. При этом происходят столкновения пакетов; станции, участвовавшие в столкновении, повторяют передачу через случайный интервал времени. Разработан целый ряд модификаций метода и механизмов управления стабильностью ЛС.

В общей шине с упорядоченным доступом [29] передача информации по шине производится кадрами переменной длины, формат которых включает стартовый флаг, такт резервирования запросов и переменное число тактов, отводимых под пакеты данных. Контроллер шины формирует стартовый флаг для указания станциям на начало нового кадра и окончание предыдущего. В такте резервирования запросов каждой станции, подключенной к шине, отводится однабитовая позиция, установка которой в единицу означает наличие на станции пакета для передачи в данном кадре. В конце такта резервирования все станции знают о разрешении им передачи пакета.

Следует отметить, что любая стратегия управления может быть применена в ЛС с любой топологией, например кольцо с соперничеством.

Кратко рассмотрим две наиболее типичные разработки в области ЛС из мини- и микроЭВМ, иллюстрирующие различные топологии и стратегии управления (табл. 5.16).

Кроме рассматриваемых имеются и другие известные ЛС, в первую очередь такие, как Cluster/One, Net/One, Z-net, ILNA и др.

Сеть Polynet. Сеть состоит из следующих компонентов: узлов сети, являющихся точками входа и выхода сети; коммуникационного кабеля, представляющего собой три витые телефонные пары и соединяющего до 254 узлов в кольцо; настенных разъемов, обеспечивающих соединение кабеля с узлами сети; мониторинг станции, которая анализирует и управляет сетью и обеспечивает электропитание сети; в большинстве случаев одного или более дополнительных устройств электропитания; устройств сопряжения, включающих микропроцессоры. Устройства обеспечивают связь сети с ЭВМ, выходящими на интерфейсы Unibus и Q-bus фирмы DEC а также интерфейс Multibus фирмы Intel.

Сеть Ethernet. Сеть состоит из ряда функциональных блоков: пассивной передающей среды (коаксиальный кабель); приемопередатчиков; средств подключения приемопередатчиков к кабелю — коннекторов; средств обнаружения несущей частоты и конфликтных ситуаций; часов; терминаторов для коаксиального кабеля, обеспечивающих необходимые характеристики с учетом отражения; повторителей для соединения отдельных сегментов сети (отрезков кабеля между терминаторами) друг с другом с целью обеспечения топологической гибкости.

Универсальные ЛС

Характеристика	Polynet	Ethernet	Стандарт P-802	Mod-way
Канальный уровень: протокол кадра формат данных кадра доступ	СФ Ф ЦО	Ст. П CSMA/CD	Ст. П CSMA/CD, МШ, МП	СФ Ф Пр
Физический уровень: способ кодирования скорость передачи, Мбит/с	М 1	М-П 10	М-Отн. 1...20	М-П 1,544
Топология	К	ОК	ОК	Пр.

Примечание: К - кольцо; М - манчестерский; МП-маркерный последовательный; МШ - маркерный широкополосный; ОК - общий коаксиал; Отн. - относительный; П - переменный; Пр. - произвольный; Ст. - стандартный; СФ - специальный формат; Ф - фиксированный; ЦО - центральный опрос

Узловые ЭВМ подключаются к сети через приемопередатчики с помощью соответствующих УС.

Минимальная конфигурация сети изображена на рис. 5.2.

Функциями канального уровня являются: определение границ информации кадров; обеспечение адресации; обнаружение ошибок передачи; распределение канала (предупреждение конфликтов); разрешение соперничества (обработка конфликтов). Этот уровень определяет коммуникационную возможность, независимую от характеристик передающей среды, базирующуюся на физическом канале, обеспечиваемом физическим уровнем.

Поскольку целью многоуровневой архитектуры является изоляция канального уровня от зависящих от специфики передающей среды аспектов, физический уровень полностью специфицирует физические характеристики.

Функциями физического уровня являются: синхронизация, кодирование/декодирование информации, передача/прием кодированной информации, обнаружение несущей частоты, выявление конфликтов.

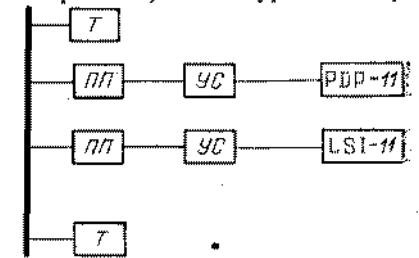


Рис. 5.13. Минимальная конфигурация сети Ethernet:

T - терминатор; ПП - приемопередатчик; УС - устройство сопряжения

5.9. ИНТЕРФЕЙСЫ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Распределенные системы управления (PCY) являются специальным видом систем управления, образующих информационно-неразделимое функционально целое с некоторым внешним объектом, информационные процессы которых синхронизированы. Две основные особенности выделяют PCY как подкласс таких систем управления: PCY предназначена для управления, т. е. влияния на физические процессы в объекте путем обработки информации о текущем его состоянии; обработка в PCY осуществляется распределенно-взаимосвязанной и скоординированной совокупностью относительно независимых ВС.

Таким образом, PCY представляет собой координированно-децентрализованную ВС реального времени, характеризующуюся следующими свойствами: множеством локальных автономно функционирующих операционных систем, ЭВМ и процессов с общей координирующей системных задач; единой интегрированной базой данных, физически распределенной в доступных для пользователя устройствах; единой интегрированной СПД, возможно с резервированием, обеспечивающей свободный доступ к данным; реконфигурируемостью обработки информации; наличием интерфейса пользователя (датчики, человек) в одном или многих узлах системы.

Основными сферами применения PCY являются сложные объекты, состоящие из множества рассредоточенных подсистем (подобъектов), характеризующихся сложностью задач управления, высокими требованиями к качеству управления и имеющими, возможно, многоуровневую организационную структуру.

Основными элементами PCY являются: станции (или узлы), сосредоточенные в одном конструктиве; передающая среда; устройства сопряжения (УС) узлов с сетью.

В отечественной литературе совокупность средств реализации транспортных уровней передачи данных в PCY называется интерфейсом линейной (многоточечной) последовательной связи (ИЛПС).

Логическое соединение (ассоциация) может быть статическим, (преобладающее в PCY) и динамическим. Структура соединений парная (1:1), широковещательная или групповая (1:K), центральная (K:1), многоточечная (K:M, K:K).

Сеть может быть разбита на подсети с произвольной топологией (шина, кольцо, звезда, точка-точка). Требуемое удаление станций (в зависимости от объекта) от сотен метров до нескольких километров, число станций PCY от 16 до 128.

С точки зрения требований к СПД можно выделить PCY централизованного контроля и сбора данных рассредоточенных объектов, PCY сложными установками (цехами, летательными аппаратами и т. д.), PCY предприятия в виде сети управляющих ЭВМ. Архитектура, протоколы и их реализация для каждого типа PCY могут существенно различаться.

Требования ИЕС на пропускную способность СПД связаны с расстоянием передачи: 100 кбит/с на 200 м; 30 кбит/с на 2000 м. Для некоторых приложений, например автоматизации эксперимента, пропускная способность СПД может быть существенно больше, например 5000 кбит/с на расстояние до 2000 м.

Целостность информации при передаче характеризуют два показателя: коэффициент необнаруженных ошибок (доля искаженных битов в переданном сообщении); частота необнаруженных ошибок (число сообщений или кадров за некоторый период времени, содержащих искаженную информацию, но принятых как правильные).

Функциональная полнота СПД характеризуется количеством услуг передачи, предоставляемых пользователям PCY. В число услуг входят обработка и статистика ошибок, различные типы ассоциаций и адресации задачи, согласование потоков информации и т. д. Повышение полноты связано обычно с усложнением обработки сообщений при

Таблица 5.17

Интерфейсы распределенных систем управления

Интерфейс	Уровень стандартизации	Применение
Последовательный ИЕС 625-1	Проект ИЕС, Стандарт HP-1L	Малые системы сбора данных низкой стоимости и потребляемой мощности
Последовательная магистраль САМАС	EUR-6100, ИЕС 640, ГОСТ 26.201.2—84	Многочрепные системы управления и сбора данных в системах и научно-технических распределенных объектах
Proway	Проект ИЕС	Системы управления крупными технологическими объектами и процессами с большими потоками данных
ИЛПС2	Проект ММ СМ ЭВМ	Системы управления средними технологическими объектами и процессами
MIL-1553B, MIL-1773	Стандарт США	Специальные системы управления летательными аппаратами

передаче, требует более сложных интерфейсов и увеличивает запаздывание передачи.

Анализ применения PCY показывает, что в них достаточно широко используются унифицированные последовательные интерфейсы (табл. 5.17), рассматриваемые в данной главе. Разрабатываемая ИЕС спецификация Proway ориентирована на автоматизацию управления технологическими процессами, обеспечивает работу в реальном масштабе времени, гарантирует время доступа в пределах 2 мс, может обслуживать до 100 абонентов, предусматривает скорость передачи 1...2 Мбит/с и высокую гарантированную надежность передачи (одна ошибка в течение 100 лет работы сети), обеспечивает резервирование путей передачи данных, имеет развитый протокол канального уровня. Рекомендации спецификации широко используются при создании других PCY.

Тема 6. Информационное обеспечение программируемых систем управления

6.1. Информационные показатели сообщений, сигналов и каналов связи

Информация - это заранее неизвестные данные, заключённые в сообщениях.

Если некоторый объект с равной вероятностью $P_i=0,5$ может находиться в двух противоположных состояниях (например “включён” и “отключён”), то количество информации, содержащейся в таком сообщении равно $I=-\log P_i=\log 2$. Единицу количества информации при основании логарифма 2 называют *двоичной (битом)*. Набор из 8 битов информации составляет *байт*. При $P_i \rightarrow 0$ имеем $I = \lim[-\log P_i] = \infty$; при $P_i \rightarrow 1$ получим $I=0$.

Помехи вызывают ошибки в передаваемом сообщении. Мерой беспорядочности состояния источника информации (ИИ), т.е. характеризующей среднюю степень неопределённости его состояния, служит *энтропия*

$$H = - \sum_{i=1}^{N_{II}} P_i \log P_i, \quad (6.1)$$

где N_{II} - число состояний ИИ.

При равновероятных состояниях ИИ ($P_i=1/N_{II}$) и статистической независимости этих состояний:

$$H = H_{max} = \log N_{II}. \quad (6.2)$$

Если ИИ может находиться в двух взаимоисключающих состояниях, например, в состоянии 0 с вероятностью P_1 и в состоянии 1 с вероятностью $P_2=1-P_1$, то

$$H = [p_1 \log P_1 + (1 - p_1) \log(1 - p_1)]. \quad (6.3)$$

До приема сообщения у приемника наблюдается неопределённость относительно состояния объекта управления (ОУ), равная его энтропии. После получения сообщения состояние объекта становится известным (с определённым искажением). Таким образом, энтропия, это мера недостатка информации о состоянии ОУ. Если сообщение принято достоверно, то $H=1$ (согласно (6.1)).

ПСУ должна обеспечить неискажённую передачу и обработку информации от источника ИИ к пользователю П (приемнику). Для этого должны быть выполнены следующие требования: своевременность получения информации пользователем; достоверность передачи информации (без потерь и искажений); безотказность и технико-

экономическая эффективность СТЛМ. Кроме того, СТЛМ должна предусматривать регулирование информационных потоков (для равномерной загрузки технических средств и операторов).

Поток информации характеризуется источником информации; целью информирования; форматом (структурой сообщений при вводе, передаче и выводе, алгоритмом идентификации сообщений); объёмно-временными характеристиками (распределением количества передаваемой информации во времени); периодичностью возникновения (и передачи), приема (и выдачи) информации в реальном масштабе времени; объектом (или субъектом), использующим информацию.

Более детально поток информации характеризуется: видом информации (аналоговая, дискретная); видом измеряемого процесса или контролируемого параметра (температура, давление, расход топлива и др.), диапазоном измерения параметра, числом одноимённых параметров объекта, номенклатурой измеряемых параметров, условием отображения информации (индикация, сигнализация, управляющие воздействия), скоростью генерации информации.

Источник информации ИИ может выдавать дискретные или непрерывные сигналы со средней скоростью, называемой производительностью источника:

$$R_u = I_u(\tau)/\tau,$$

где $I_u(\tau)$ – среднее количество информации в сообщении, время передачи которого не превышает τ секунд; τ – время передачи одного сообщения (скорость передачи информации, соответствующая передаче двоичной единицы (0; 1) за секунду, называется *бод*).

В качестве обобщённых параметров переносчика информации (информационного сигнала) можно принять следующие: ширину амплитудно-частотного спектра F_c ; отношение сигнал/помеха $Q_c = \log_2(P_c/P_{nc})$, где P_c и P_{nc} – средние мощности сигнала и помехи; длительность существования сигнала τ_c ; объём (ёмкость) сигнала $V_c = F_c Q_c \tau_c$.

Кроме того, применяются следующие информационные параметры (показатели) сигналов: диапазон D измерения и передачи входного параметра (сигнала) x ; разрешающая способность Δx при измерении и передаче параметра x ; разрядность r_u (r_u – число достоверных разрядов); число точек N_x измерения (отсчётов); минимальный интервал времени τ_x , за который сигнал x изменится на величину D ; минимальный интервал времени $\Delta \tau_x$, за который сигнал x изменится на шаг Δx ; количество информации I_x , получаемой при измерении параметра x (при равной вероятности $P_x=1/N_x$ символов N_x); скорость изменения

(генерирования) информации v_u при измерении параметра x , которые определяются по зависимостям:

$$\left. \begin{aligned} D_x &= x_{max} - x_{min}; \\ \Delta_x &= 2\delta_x D_x; \\ r_H &= 2^m \approx 1/\delta_x; \\ N_x &= (D_x/\Delta_x) + 1; \\ \tau_x &= D_x \left/ \left| \frac{dx}{dt} \right| \right|_{max}, \\ I_x &= -\log_2 P_x = \log_2 \left(\frac{D_x}{\Delta_x} + 1 \right) = \log_2 \left(\frac{1}{2\delta_x} + 1 \right); \\ v_u &= \frac{dI_x}{dt} = \frac{1}{\delta_x \tau_x} \log_2 \frac{2\delta_x + 1}{2\delta_x} \end{aligned} \right\} \quad (6.4)$$

где $\delta_x = [(x-x_u)/x_u] 100\%$ - допустимая погрешность измерения (x и x_u - текущее измеренное и истинное значения параметра x); m - число двоичных разрядов.

Канал извлечения и передачи информации (канал связи - КС) определяется местоположением начала и конца; формой передаваемой информации (непрерывная, дискретная); структурой (датчик, кодер, модулятор, линия, демодулятор, декодер, устройство отображения и др.); скоростью передачи и объёмом передаваемой информации; пропускной способностью; помехоустойчивостью; информационным согласованием звеньев канала по производительности; оперативностью (временем включения в работу).

Обобщённые параметры КС определяются его структурой, типом и режимом использования: ширина полосы пропускания F_K (амплитудно-частотная характеристика); отношение сигнал/помеха $Q_K = \log_2(P_K/P_{пк})$, где P_K и $P_{пк}$ - средние мощности (энергии) сигнала и помехи в канале; длительность передачи сигнала по каналу τ_K (суммарное время передачи данного сигнала по каналу); объём канала, т.е. его ёмкость: $V_K = F_K Q_K \tau_K$.

Каждый канал должен обеспечивать неискажённую передачу сигнала, т.е. должно быть выполнено согласование канала передачи и сигнала по параметрам. Необходимым (но недостаточным) условием, при котором возможна принципиальная возможность согласования,

является условие $V_c \leq V_K$. Достаточным условием является согласование по всем обобщающим параметрам: $F_c \leq F_K$; $Q_c \leq Q_K$; $\tau_c \leq \tau_K$.

Согласование достигается трансформацией сигнала с изменением объёма V_c (деформацией F_c , Q_c , τ_c) или без его изменения. При этом может изменяться длительность передачи сигнала (за счёт изменения τ_c , основания кода или повторения передачи), полоса частот (за счёт изменения условий модуляции, кодирования сигнала) и отношение сигнал/помеха (за счёт изменения уровней сигнала и помех). Кроме того, используется преобразование сигнала без деформации с сохранением объёма V_c путём переноса вдоль осей τ - Q - F : перенос вдоль оси τ_c (задержка сигнала), вдоль оси F (модуляция), вдоль оси уровней Q (усиление). Например, при невыполнении достаточного условия $Q_c \leq Q_K$, уменьшается Q_c за счёт изменения ширины спектра или длительности сигнала: увеличением основания кода при кодировании сигнала, приводящем к расширению его спектра; увеличением длительности передачи и уменьшением требуемого уровня мощности сигнала.

На входы ПСУ поступает значительное число однородных и разнородных по физической природе величин (механических, тепловых, электрических и др.) и сопутствующих им влияющих величин, которые могут быть постоянными во времени или изменяющимися (процессы, функции), сосредоточенными в точке или распределёнными по пространству (процессы, функции, поля); непрерывными или дискретными; активными (оказывающими энергетическое воздействие на входные устройства - давление, электрический ток и напряжение, световые и тепловые излучения) и пассивными (сопротивления электрические и механические, жесткость и т. п.)

Поэтому ПСУ являются многоканальными с информационными и информационно - энергетическими свойствами элементов, с информационными прямыми и обратными связями, с обязательным наличием рецепторных элементов (датчиков). Источником измерительной информации в ПСУ являются технологические процессы, протекающие в ОУ.

Пропускная способность ПСУ характеризует максимально допустимую этой системой (по всем возможным источникам информации) степенью скорость извлечения и передачи информации с заданной степенью достоверности (с заданной точностью)

$$C = \max R \text{ при } \varepsilon \leq \varepsilon_{дон}.$$

Здесь $R = I_m/T$; I_m - среднее количество информации (в битах), передаваемой или извлекаемой системой за время T (в секундах); ε -

показатель достоверности (или точности) передачи (извлечения) информации (вероятность ошибки $P_{ош}$, погрешность δ и т.п.).

При разработки системы сравниваются S различных вариантов её построения, выбирается наилучший из некоторого множества M_s допустимых вариантов. Стремятся получить максимальное значение C_{max} пропускной способности:

$$C_{max} = \max_{S \in M_s} C \text{ при } \varepsilon \leq \varepsilon_{доп}.$$

При этом в процессе поиска C_{max} может варьироваться не только структура системы, но и значения её параметров. Чем шире множество M_s , т.е. чем менее жесткие ограничения накладываются при решении задачи оптимизации, тем большим (лучшим) будет значение C_{max} . То предельное значение C_{max} , которое может быть достигнуто при весьма слабых ограничениях, принимают за потенциальную (предельно теоретически допустимую) пропускную способность системы.

При определении пропускной способности необходимо учитывать действие помех и других источников ошибок, т.е. необходимо учитывать взаимную связь между показателями пропускной способности, точности и помехоустойчивости. Система обработки экспертной информации состоит из трех основных частей: канала передачи (обработки) информации, кодера и декодера. В частном случае какая-то из этих частей может отсутствовать. Канал может быть непрерывным или дискретным.

Датчики, приборы, ПСУ, в том числе измерительные экспертные системы (ИЭС), служащие для определения текущего состояния ОАУ, используют различные физические, химические и биологические процессы. Некорректное обоснование операций контроля и управления, а также параметров технических средств, осуществляющих эти операции, может привести к существенному снижению достоверности и точности обрабатываемой информации, т.е. её полезности. Поэтому очень важно оценить степень неопределённости этой информации.

Количественной оценкой качества извлечения информации о состоянии ОАУ является уменьшение неопределённости о значении структурного параметра ОАУ или его составного элемента (СЭ), полученное за счёт достаточно точного измерения этого параметра или косвенно с ним связанного признака состояния:

$$I = H(x) - H(x/x_n), \quad (6.5)$$

где I – количество полученной информации о состоянии ОАУ или его СЭ за счёт измерения параметра x ; $H(x)$ – энтропия (мера неопреде-

лённости) структурного параметра (или косвенно с ним связанного признака) до его измерения; $H(x/x_n)$ – энтропия (условная) действительного значения x измеряемого параметра (мера интервала неопределённости) вокруг полученного после измерения значения параметра x_n , т.е. это энтропия погрешности измерений параметра (косвенного признака).

Поскольку априори известно, что измеряемый признак (параметр) x может находиться в пределах: $x \in [x_1, x_2]$, а ПСУ имеют погрешность измерения этого параметра $\pm \Delta_x$; причём $x_2 - x_1 \gg 2\Delta_x$, то можно утверждать, что действительное значение x лежит в пределах $x \in [x_n + \Delta_x; x_n - \Delta_x]$, т.е. в пределах интервала неопределённости шириной $d_g = 2\Delta_x$. Таким образом, за счёт операции измерения признака происходит сужение интервала неопределённости в $m_g = (x_2 - x_1) / 2\Delta_x$ раз.

6.2. Информационные параметры непрерывных сигналов

Если x – непрерывная (аналоговая) величина, то энтропия равна:

$$H(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \log f(x) dx, \quad (6.6)$$

где $f(x)$ – дифференциальный закон распределения вероятностей параметра x , а если $\bar{x} = \{x_1, \dots, x_n\}$ – дискретная величина, то

$$H_{\Sigma}(\bar{x}) = - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log P(x_i), \quad (6.7)$$

где n – число возможных значений, принимаемых параметром; $P\{x_i\}$ – априорная вероятность принятия параметром x значения x_i .

Если в результате измерения получено значение x_n параметра x , а погрешность измерения распределяется по закону $f(x/x_n)$ в окрестности x_n , то энтропия погрешности для непрерывного и дискретного параметра равна:

$$H(x/x_n) = - \int_{-\infty}^{\infty} f(x/x_n) \log f(x/x_n) dx; \quad (6.8)$$

$$H(x/x_n) = - \sum_{i=1}^N P(x/x_n) \log P(x/x_n). \quad (6.9)$$

Аналоговые измерительные приборы и измерительные каналы ПСУ имеют нормально распределённую погрешность. Тогда имеем:

$$f(x/x_{II}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad (6.10)$$

$$\ln f(x/x_{II}) = -\ln(\sigma\sqrt{2\pi}) - x^2/2\sigma^2, \quad (6.11)$$

$$H(x/x_n) = \ln\sigma\sqrt{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx + \frac{1}{2\sigma^2} \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x)dx. \quad (6.12)$$

Учитывая, что $\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1$, $\int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x)dx = \sigma^2$, получим

$$H(x/x_{II}) = \ln\sigma\sqrt{2\pi e}, \quad \text{а интервал неопределённости } d_a = \sigma\sqrt{2\pi e} \approx 4,133\sigma.$$

Количество информации, полученное в результате измерения параметра x аналоговыми измерителями, равно:

$$I = \ln(x_2 - x_1) - \ln\sigma\sqrt{2\pi e} = \ln[(x_2 - x_1)/(\sigma\sqrt{2\pi e})] = \ln m_a. \quad (6.13)$$

Погрешность измерения косвенного признака эквивалентна квантованию непрерывных во времени значений процесса по уровню с шагом Z . Энтропия квантованного сигнала $H_{кв}(y)$ при нормальном ДЗРВ погрешности измерения и косвенного признака, если $H(y)$ - энтропия непрерывного процесса, равна:

$$H_{кв}(y) = H(y) - \log_2 h_y, \\ H(y) = \log_2 \sqrt{2\pi e} \sigma_j, \quad (6.14)$$

где h_y - шаг квантования, характеризующий аппаратную погрешность: $h_y = 2 \Delta y$ (Δy - абсолютная погрешность измерения косвенного признака). Для нормального закона $h_y = 6 \sigma_y / Z$, тогда:

$$H_{кв}(y) = \log_2 (\sqrt{2\pi e} Z / 6). \quad (6.15)$$

Если Δy_z - допускаемое отклонение значения косвенного признака от среднего значения m_y , то $Z = 2\Delta y_z / h_y = \Delta y_z / \Delta y$. Поскольку приведенная погрешность измерения косвенного признака равна $\gamma_y = \Delta y / \Delta y_z$, то число уровней квантования $Z = 1/\gamma_y$, а $H_{кв}(y) = \log_2 (\sqrt{2\pi e} / 6\gamma_y)$ или

$$H_{кв}(y) = \log_2 (50\sqrt{2\pi e} / 3\gamma_y) \%$$

Для обеспечения согласования информационной ёмкости $I(Z) = H_{сн}$ измерительного канала и количества информации $H_{кв}(y)$, получаемого при измерении j - го косвенного признака, необходимо, чтобы $I(Z) = H_{кв}(y)$, или с учётом того, что энтропия средства измерения $H_{сн} = \log_2 (1/\delta_{сн}) = \log_2 N_{сн}$ бит, где $\delta_{сн}$ - приведённая случайная погреш-

ность этого средства, $N_{сн}$ - число различных значений (градаций) измеряемой величины y (каждое из которых находится в пределах зоны $\delta_{сн}$), получим:

$$\delta_{сн} = 0,725 \gamma_y. \quad (6.16)$$

Соотношение (6.16) позволяет назначить точность измерительного канала ПСУ исходя из необходимой точности определения j - го косвенного признака. Поскольку систематическая составляющая погрешности средств измерений всегда может быть скомпенсирована, то для j - го ДП $\delta_{сн} = 0,725 \delta_j$. Тогда систематическая составляющая погрешности определения состояния ОАУ является методической погрешностью экспертизы состояния, которая не должна превышать $\delta_{сн} \leq 0,275 \delta_j$. Ввиду того, что экспертиза состояния ОАУ сопровождается прогнозированием, а погрешность последнего зависит от δ_j , то для обеспечения необходимой точности прогнозирования необходимо $\delta_{сн}$ уменьшить относительно (6.16) ещё на 25-30 %.

6.3. Информационные параметры дискретных сигналов

Дискретизация (квантование) по уровню. Преобразование непрерывного множества аналоговых сигналов в дискретное (цифровое) множество называется дискретизацией. Дискретизация может осуществляться по уровню и по времени. Дискретизация (квантование) по уровню широко используется в информационно-измерительных системах, входящих в состав измерительных экспертных и управляющих систем, так как облегчает процесс обработки измерительной информации (позволяет производить обработку данных на компьютерах), а также во многих случаях повышает точность измерения.

При квантовании по уровню диапазон возможных изменений функции - интервал $[a, b]$ разбивается на n интервалов квантования: $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$, $i = \overline{1, n}$ с границами $x_0 = a$; x_1, \dots, x_{n-1} , $x_n = b$. В результате квантования любое из значений x , принадлежащих интервалу $[x_{i-1}, x_i]$, округляется до некоторого значения $\check{x}_i = i\Delta x$, $\check{x}_i \in [x_{i-1}, x_i]$. Таким образом, при квантовании по уровню производится отображение всевозможных значений величины x на дискретную область, состоящую из величин \check{x}_i ($i = \overline{1, n}$) - уровней квантования.

Замена истинных значений функций x соответствующими дискретными значениями - уровнями квантования \check{x}_i ($i = \overline{1, n}$), вносит погрешность, или шум квантования $\eta(x) = \check{x}_i - x$.

Частный случай квантования по уровню – равномерное квантование, при котором интервалы (шаги) квантования одинаковы:

$$\Delta x = \Delta x_i = x_i - x_{i-1} = \frac{b-a}{n}, \quad i = \overline{1, n}.$$

При заданном n наибольшая погрешность квантования $\max|\eta(x)|$ минимальна, если $\Delta x_i = \Delta x = \text{const}$ и уровень квантования \bar{x}_i выбирается в середине интервала: $\bar{x}_i = 0,5(x_i + x_{i-1})$. В этом случае максимальная погрешность квантования равна: $\max|\eta(x)| = 0,5\Delta x$.

На рис.6.1,а показана функциональная связь непрерывной величины (воздействия) с дискретной величиной, полученной на выходе устройства квантования (реакцией), которая называется амплитудной характеристикой квантователя (приведен случай равномерного квантования). На рис.6.1,б приведена зависимость погрешности квантования от значений непрерывной величины x .

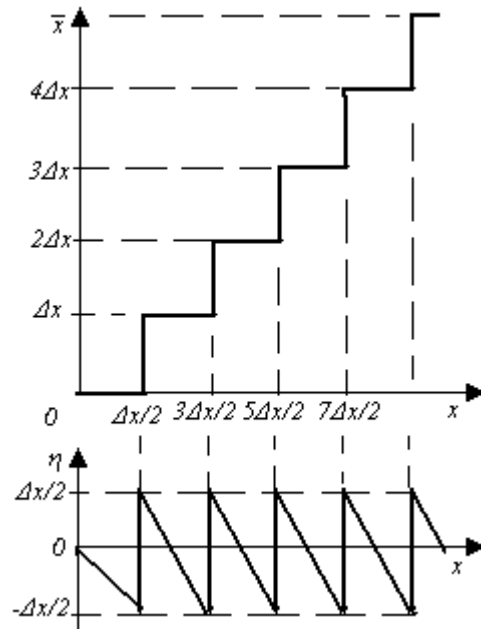


Рис.6.1. Зависимость погрешности квантования от значений непрерывной величины $x(t)$

Характеристикой статистической (случайной) погрешности квантования по уровню является дисперсия погрешности шума квантования. При большом числе уровней квантования значение этой дисперсии не зависит от вида закона распределения непрерывной (аналоговой) величины x и равна $D[\Theta(x)] = (\Delta x)^2 / 12$. Средняя квадратическая погрешность квантования (СКПК) $\sigma_\eta = \Delta x / (2\sqrt{3})$ в $\sqrt{3}$ раз меньше максимальной погрешности.

Приведенные формулы справедливы только для равномерного квантования. Для уменьшения СКПК выгоднее применять неравномерное квантование, причем выигрыш тем значительнее, чем больше закон распределения аналоговой величины отличается от равномерного. Однако практически неравномерное квантование применяется очень редко, ввиду трудности и неудобства аппаратурной реализации такого квантователя.

Дискретизация по времени. При дискретизации по времени непрерывная по аргументу функция $x(t)$ преобразуется в функцию $x(t_n)$, $n = \overline{1, \infty}$ дискретного аргумента t_n , т.е. заменяется мгновенными значениями, взятыми в моменты t_n (функцию от дискретного времени обозначают ещё так: $x[n]$, $n = \overline{1, \infty}$).

Дискретизация по времени может применяться с целью вычисления статистических характеристик исследуемого процесса, а также для удобства передачи или хранения информации в микропроцессорных системах. В последнем случае ставится задача восстановления исходной функции по отсчётам $x[n]$. Исходная функция может быть восстановлена с некоторой погрешностью. Функцию $y(t)$, полученную в результате восстановления по отсчётам $x(t_n)$, называют воспроизводящей. Воспроизводящая функция $y(t)$ строится как взвешенная сумма некоторого ряда функций $f_i(t - t_n)$:

$$y(t) = \sum_{i=0}^{\infty} d_i [x(t_K), x(t_{K-1}), \dots] f_i(t - t_K),$$

причём коэффициенты разложения d_i зависят от отсчётов $x(t_K)$, $x(t_{K-1}), \dots$

При дискретизации по времени необходимо выбрать шаг дискретизации $\Delta t = t_n - t_{n-1}$. При малых значениях Δt количество отсчётов функции на отрезке $[0, T]$ будет большим и точность воспроизведения высокой. При больших значениях Δt количество отсчётов

уменьшится, но при этом точность восстановления снизится. Оптимальной является такая дискретизация, которая обеспечивает представление исходной информации с заданной точностью минимальным количеством отсчётов $x[n]$.

Методы дискретизации и восстановления непрерывных функций различаются по следующим основным признакам (рис. 6. 2):

- 1) по регулярности отсчётов;
- 2) по критерию выбора отсчётов и оценки точности воспроизведения;
- 3) по способу воспроизведения;
- 4) по виду воспроизведённых функций.

Оценка качества дискретизации

Качество способа дискретизации, согласно которому отбираются отсчёты или коэффициенты разложения функции, оценивают по той погрешности, с которой удаётся воспроизвести исходную функцию или измерить статистические характеристики.

Группа критериев выбора отсчётов должна обеспечить такие модели сигнала и такой способ его воспроизведения, чтобы погрешность воспроизведения стремилась к нулю. К таким критериям относятся частотный критерий В.А. Котельникова, корреляционный критерий Н.А. Железнова, квантовый критерий Ф.Е. Темникова, энтропийный критерий П.В. Новицкого и др.

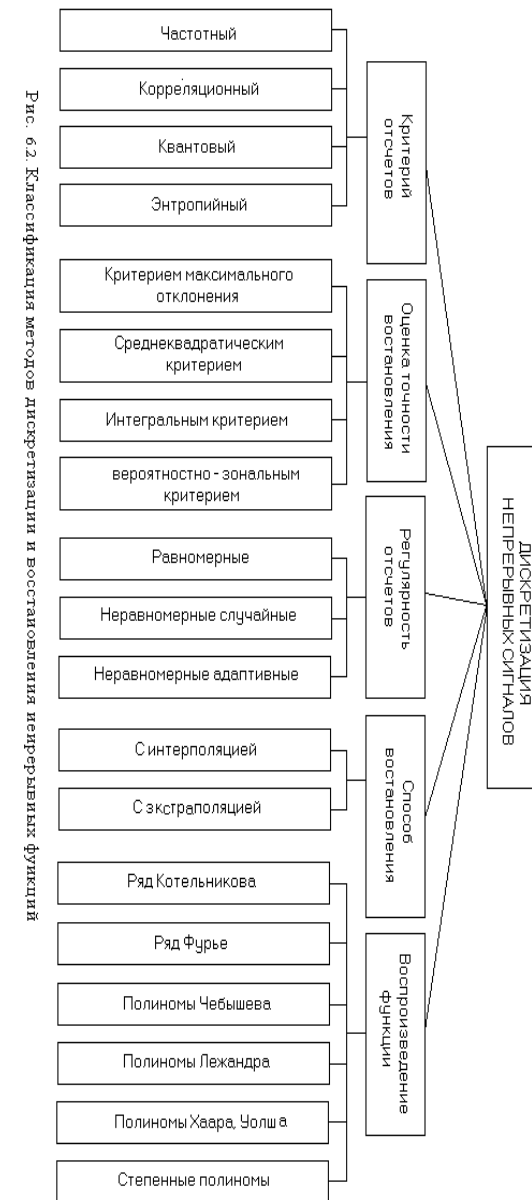
Частотный критерий В.А. Котельникова гласит:

Если непрерывная функция $x(t)$ удовлетворяет условиям Дирихле (ограничена, кусочно-непрерывна и имеет конечное число экстремумов) и её спектр ограничен некоторой частотой ω_M , то существует такой максимальный интервал Δt между отсчётами, при котором имеется возможность восстановить исходную функцию $x(t)$ по дискретным отсчётам (с погрешностью, близкой к нулю), взятым с интервалом

$$\Delta t = \pi / \omega_M = 1 / 2f_M. \quad (6.17)$$

Выражение (6.17) является следствием теоремы Котельникова, которая гласит, что указанную функцию $x(t)$ можно представить рядом

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k\Delta t) \frac{\sin[\omega_M(t - k\Delta t)]}{\omega_M(t - k\Delta t)}. \quad (6.18)$$



Особое значение теоремы Котельникова состоит в том, что она позволила заменить задачу передачи непрерывных сообщений более простыми задачами передачи дискретных сообщений. Однако, следует заметить, что информация об исследуемом объекте (сообщение) в общем случае является случайным процессом, обладающим бесконечным спектром. Между тем теорема Котельникова справедлива лишь для функций с ограниченным спектром. Реальные сигналы, являющиеся носителями информации, имеют начало и конец, т.е. непрерывные функции, описывающие такие сигналы, имеют конечную длительность. Но такие функции не могут иметь ограниченный спектр. Таким образом, для сигналов конечной длительности теорема Котельникова неприменима. Кроме того, существует ряд других трудностей практического применения теоремы Котельникова.

Прежде всего, следует отметить, что представление непрерывной функции в виде дискретных отсчётов через промежуток $\Delta t = 1/2f_M$ не позволяет воспроизводить процесс, развивающийся во времени (переходные процессы). Во вторых, получение функции отсчётов связано с использованием фильтра нижних частот, причём функция воспроизводится тем точнее, чем ближе используемый фильтр к идеальному. Однако известно, что увеличение крутизны среза такого фильтра ведёт к увеличению задержки в получении сигналов на выходе, т.е. приводит к значительному запаздыванию при восстановлении сигнала. Наконец, для реальных сигналов граничная частота среза f_M является величиной, для выбора которой нет достаточно обоснованных критериев.

Приведённые замечания свидетельствуют о том, что применение теоремы Котельникова вызывает затруднение, если она рассматривается как точное утверждение. Обычно требуется не идеальное воспроизведение, а воспроизведение функций с определённой точностью. Поэтому теорему Котельникова следует рассматривать как приближённую для функций с неограниченным спектром. Погрешность восстановления функции с неограниченным спектром рядом Котельникова (6.18), оцениваемая относительной средней квадратической погрешностью отклонения восстановленной функции $y_1(t)$ от исходной $x(t)$ определяется неравенством

$$\sqrt{\frac{E_M}{E}} \leq \frac{(\int_{-\infty}^{\infty} [x(t) - y(t)]^2 dt)^{1/2}}{(\int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt)^{1/2}} \leq 1,73 \sqrt{\frac{E_M}{E}}$$

где E - полная энергия спектра, а E_M - энергия, заключенная в высокочастотной части спектра, т.е. в полосе частот выше частоты f_M .

Из изложенного следует, что при съёме информации с ОАУ, измерении j -го признака состояния ОАУ и обработке информации в измерительном канале ПСУ возникают потери информации. Причём эти потери возрастают с ростом погрешности измерений и снижением достоверности экспертизы.

Измерительные каналы ПСУ, построенные на базе цифровых элементов, имеют равномерное распределение показаний x в пределах диапазона измерений $D = x_2 / x_1$ этих каналов:

$$f(x) = \begin{cases} 1/(x_2 - x_1) npu & x \in [x_1, x_2]; \\ 0 & npu \quad x \notin [x_1, x_2]. \end{cases} \quad (6.19)$$

Энтропия до измерения в этом случае равна:

$$H(x) = - \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{x_2 - x_1} \ln \frac{1}{x_2 - x_1} = \ln(x_2 - x_1), \quad (6.20)$$

а после измерения:

$$f(x/x_n) = \begin{cases} 1/d_g = 1/(2\Delta_x) & npu \quad x \in [x_1, x_2] ; \\ 0 & npu \quad x \notin [x_1, x_2] . \end{cases} \quad (6.21)$$

$$H(x/x_n) = - \int_{x_n - \Delta_x}^{x_n + \Delta_x} \frac{1}{2\Delta_x} \ln \frac{1}{2\Delta_x} dx = \ln 2\Delta_x. \quad (6.22)$$

Количество информации, полученное в результате измерения параметра x цифровыми измерителями, равно:

$$I = H(x) - H(x/x_n) = \ln[(x_2 - x_1)/(2\Delta_x)] = \ln m_g. \quad (6.23)$$

Число различных градаций результата измерения параметра x при распределении (6.19) равно:

$$m_a = (x_2 - x_1)/d_a = (x_2 - x_1)/(4,133\sigma). \quad (6.24)$$

6.4. Способы восстановления исходных функций

Следует выделить два способа воспроизведения исходного сигнала: воспроизведение с экстраполяцией и воспроизведение с интерполяцией. Методы дискретизации с экстраполяцией воспроизводящих функций не требуют задержки сигналов в пределах интервала дискретизации. Следовательно, они могут использоваться в системах, работающих в реальном масштабе времени. Дискретизация с интерполяцией требует задержки сигналов на интервал интерполяции. Подбор воспроизводящих функций $y(t)$, которые при минимальном числе

членов разложения обеспечивали бы необходимую точность восстановления, в общем случае связан с определёнными трудностями, Априорные сведения о сигналах, подлежащих дискретизации, как правило, весьма ограничены. Поэтому выбор типа воспроизводящих функций в основном определяется требованиями ограничения сложности устройств дискретизации при восстановлении сигналов. Основные типы воспроизводящих функций приведены на рис. 6.2.

Требованию простоты нахождения коэффициентов разложения прежде всего отвечают степенные алгебраические полиномы Лагранжа. Чаще всего из этого класса функций применяются полиномы нулевой и первой степени.

Ступенчатая аппроксимация

1. Нулевая степень воспроизводящего многочлена

Многочлен Лагранжа для равноотстоящих узлов t_i на отрезке $[t_0, t_n]$ может быть записан в следующем виде

$$L_n(t) = L_n[t_0 + \chi \Delta t_n] = (-1)^n \frac{\chi(\chi-1)\dots(\chi-n)}{n!} \sum_{i=0}^n (-1)^i \frac{C_n^i x(t_i)}{\chi^{-i}},$$

где $t_1 - t_0 = t_2 - t_1 = \dots = t_i - t_{i-1} = \Delta t_n$;

$\chi = (t - t_0) / \Delta t_n$; $n = 0, 1, 2, \dots$; $i = 0, 1, 2, \dots, n$.

Погрешность восстановления исходной непрерывной функции с ограниченными производными многочленом Лагранжа $L_n(t)$ определяется остаточным членом

$$R_n(t) \leq \frac{M_{n+1}}{(n+1)!} \Delta t_n^{n+1} / \chi(\chi-1)\dots(\chi-n), \quad (6.25)$$

где M_{n+1} - модуль максимального значения $(n+1)$ -й производной функции $x(t)$.

Шаг равномерной дискретизации выбирается таким образом, чтобы по отсчётам функции $x(t_i)$ можно было бы восстановить исходную функцию $x(t)$ многочленом Лагранжа $L_n(t)$ с погрешностью

$$R_n(t) \leq \varepsilon_0, \quad (6.26)$$

где ε_0 - допустимая погрешность дискретизации по времени.

При нулевой степени воспроизводящего многочлена остаточный член (6.25) имеет вид

$$R_0(t) \leq M_1 \Delta t_0 \chi. \quad (6.27)$$

Очевидно, что максимальное значение $R_0(t)$ принимает при $\chi = 1$. С учетом (6.26) и (6.27) шаг равномерной дискретизации $\Delta t_0 \leq \varepsilon_0 / M_1$.

Воспроизводящая функция $y(t) = L_0(t)$ для j -го интервала дискретизации $[t_{0j}, t_{0(j+1)}]$; $j = 0, 1, 2, \dots$ при восстановлении с экстраполяцией имеет вид (рис.6.3,а) $y_j(t) = x(t_{0j})$, а при восстановлении с интерполяцией $y_j(t) = x(t_{0(j+1)})$.

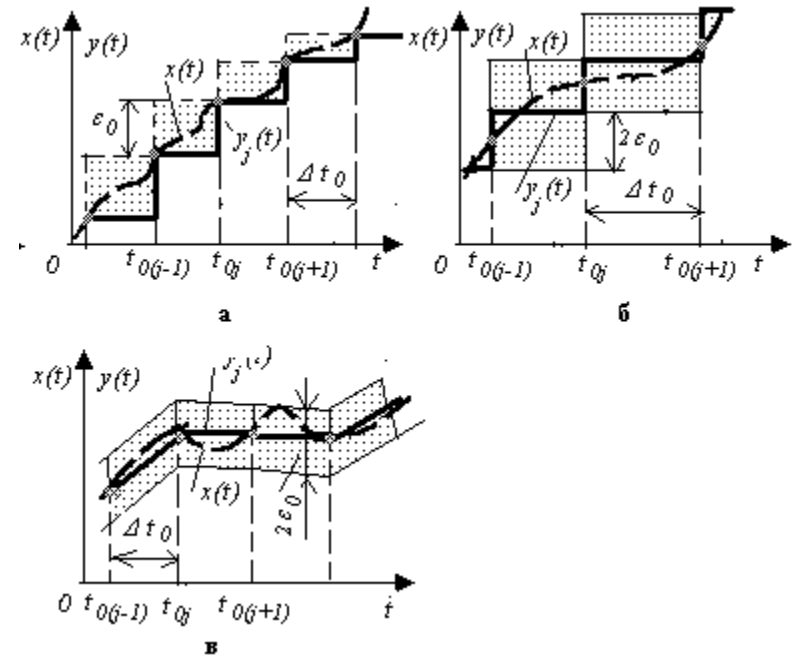


Рис.6.3: а,б – ступенчатая аппроксимация сигнала при различных значениях показателя качества приближения (а - $\lambda_{max} = 1$; б - $\lambda_{max} = 2$); в – линейная аппроксимация сигнала

Показатель качества приближения на каждом из интервалов дискретизации Δt_0 может достигать значения $\lambda_{max} = 1$ (показатель качества приближения λ есть максимальное число точек на интервале дискретизации, выбираемых из условия, что разность $x_j(t) - p_j(t)$

принимает максимально допустимое значение при чередовании её знака).

При воспроизводящих функциях вида

$$y_j(t) = 0,5[x(t_{0j}) + x(t_{0(j+1)})] \quad (6.28)$$

шаг равномерной дискретизации может быть увеличен в 2 раза без увеличения погрешности (рис.6.3,б): $\Delta t_0 \leq 2\varepsilon_0 / M_1$.

Этот случай в пределе соответствует наилучшему приближению ($\lambda_{\max} = 2$) функции $x(t)$ на интервале Δt_0 полиномом нулевой степени (6.28).

2.Линейная аппроксимация (1-я степень воспроизводящего многочлена).

Допустимый шаг равномерной дискретизации в этом случае $\Delta t_1 \leq \sqrt{8\varepsilon_0 / M_2}$.

При этом воспроизводящая функция может быть представлена на j -м интервале дискретизации в виде (рис.6.3,в)

$$y_j(t) = x(t_{0j}) + [x(t_{0(j+1)}) - x(t_{0j})](t - t_{0j}) / \Delta t_1,$$

где $t_{0j} \leq t \leq t_{0(j+1)}$.

Показатель качества приближения на каждом из интервалов $[t_{0j}, t_{0(j+1)}]$ может достигать значения $\lambda_{\max} = 1$.

При повышении качества приближения шаг равномерной дискретизации увеличивается. Шаг равномерной дискретизации для многочленов $L_n(t)$ степени $n \geq 2$ находится по формулам (6.25) и (6.26).

Существенное снижение избыточности отсчётов для дискретизации с шагом Δt_n , $n \geq 2$. получается при значениях допустимой относительной погрешности дискретизации не более 10%. При других значениях этой погрешности эффективность дискретизации с шагом Δt_n , $n \geq 2$ мало отличается от равномерной дискретизации с шагом Δt_1 (линейная аппроксимация).

Тема 7. Метрологическое обеспечение ПСУ

7.1. Точность достоверность и информативность измерительной информации

Требования к точности и достоверности измерительной информации

Поскольку цель управляющего устройства ПСУ – оценить фактическое состояние i – го структурного элемента (СЭ) ОАУ по j – му косвенному параметру (признаку), то точность и достоверность, а значит и информативность, при измерении этого параметра должны определяться необходимой точностью и достоверностью оценки состояния каждого СЭ, влияющего на косвенный параметр (далее его будем называть диагностическим -ДП). Это может быть достигнуто только при известных функциональных, статистических, логических или других закономерностях, связывающих i - ый структурный параметр – СП (однозначно характеризующий техническое состояние i - го СЭ) с j - ым ДП.

Оптимальная точность измерения СП и ДП должна устанавливаться с учетом ресурса и наработки СЭ объекта управления к моменту его испытания, а также закономерностей изменения СП и технико-экономических характеристик ОАУ. Однако при разработке технических средств УУ целесообразно устанавливать предварительно ориентировочную точность измерения СП. В соответствии с требованиями международных и государственных стандартов предельная абсолютная Δ_{Π} и приведенная относительная δ_{Π} погрешности измерения физических величин устанавливаются в виде:

$$\begin{cases} \Delta_{II} = (0,2 \div 0,35) \Delta P_{II} & ; \\ \delta_{II} = (\Delta_{II} / 2P_{II}) 100 \% & , \end{cases} \quad (7.1)$$

где ΔP_{II} - предельное отклонение значения измеряемого СП; P_{II} – предельное значение измеряемого СП.

При этом указанные погрешности (7.1) находят с учетом коэффициентов весомости $k_{B.T} = (\varphi_r)^n$, значения φ_r и показатели n которых выбирают исходя из категории точности, к которой отнесён испытуемый ОАУ. Например, для структурных элементов автомобиля или трактора, обеспечивающих безопасность движения и функционирования по назначению, необходимо задать $\varphi_r = 1,6$; $n = 3$, а для других СЭ, требующих экономически оптимального качества и уровня надёжности, имеем $\varphi_r = 1,6$; $n = 2$.

С учетом изложенного для приведенной погрешности (7.1) определения i – го СП по j – му ДП имеем:

$$\delta_{ij} = \frac{\Delta P_{cn,i}}{2P_{on,j}(\varphi_r)^n} 100\%, \quad (7.2)$$

где $\Delta P_{cn,i}$ - предельное отклонение i -го СП; $P_{on,j}$ – предельное значение j -го ДП (измеряемого).

Формула (7.2) справедлива только тогда, когда СП и ДП имеют одинаковую размерность, т.е. при прямых измерениях. Как правило, при применении электронных диагностических приборов ПСУ (в том числе измерительных экспертных систем –ИЭС) присутствуют косвенные измерения. В этом случае задача выбора погрешности измерения ДП формулируется следующим образом.

Обобщенный j – ый ДП отражает R групп СП. В каждой r – ой

группе ($r = 1 \div R$) насчитывается m_{ij} одноименных i -ых СП ($m_{ij} \in r$), причём может быть $m_{ij} = 1$. Необходимо определить точность определения i – го СП, влияющего на j – ый ДП. Если изменение каждой r – ой группы СП на γ_{rij} % вызывает в сумме предельное отклонение j – го ДП, то $\sum_{r=1}^R \gamma_{rij} = 100$ %. Каждый i – й СП в своей группе отклоняется на $\Delta_i^* = (\gamma_{rij} / m_{ij})$ % от своего предельного значения, т.е. на его долю приходится (γ_{rij}/m_{ij}) % предельного отклонения ДП и соблюдается условие $\sum_{r=i=1}^R \Delta_i^* = 100$ %. Так как СП и ДП исчисляются в одноименных единицах измерения, то вместо (7.2) можем записать:

$$\delta_{ij} = \frac{\Delta_i^* \cdot 100}{2[100] \cdot (\varphi_r)^n} = \frac{\gamma_{rij}}{2m_{ij} \cdot (\varphi_r)^n} \%, \quad (7.3)$$

где $[100]$ – предельное отклонение значения ДП на 100 %.

Например, состояние рулевого колеса автомобиля оценивают по ДП – суммарному люфту. Этот ДП образуется за счет износа пяти шаровых пальцев (ШП), регулировок рулевого механизма (РМ) и износа двух шкворневых соединений (ШС). Установлено, что предельное значение ДП определяется на $\gamma_{ШП} = 50$ % - ШП, на $\gamma_{РМ} = 40$ % - РМ и на $\gamma_{ШС} = 10$ % - ШС. Тогда имеем для второй категории точности: $\delta_{ШП} = 50/(2 \cdot 5 \cdot 1,6^3) = 1,22$ %; $\delta_{РМ} = 40/(2 \cdot 1 \cdot 1,6^3) = 4,9$ %; $\delta_{ШС} = 10/(2 \cdot 2 \cdot 1,6^3) = 0,61$ %.

В общем случае j – ый обобщенный ДП y_j связан с набором x_i СП, определённой закономерностью $y_j = f(x_{i1}, \dots, x_{in})$, причём различные СП оказывают разное влияние на y_j . Степень этого влияния может быть оценена с помощью функций чувствительности: простой D_{ij} и логарифмической A_{ij} :

$$D_{ij} = \frac{\partial f}{\partial x_i} ; \quad A_{ij} = \frac{\partial f}{y_j} \bigg/ \frac{\partial x_i}{x_i} . \quad (7.4)$$

Таким образом, погрешность измерения δ_j j – го ДП является функцией D_{ij} (или A_{ij}) и δ_{ij} .

При косвенных измерениях относительная погрешность измерения j – го ДП равна:

$$\delta_{y_j} = \frac{\Delta y_j}{y_j} = \left[\left(\frac{\partial y_j}{\partial x_{i1}} \right)^2 \left(\frac{\Delta x_{i1}}{y_j} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial y_j}{\partial x_{im}} \right)^2 \left(\frac{\Delta x_{im}}{y_j} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (7.5)$$

или с учетом (7.4):

$$\delta_{y_j} = \left[\sum_{i=1}^m (A_{ij} \delta_{ij})^2 \right]^{1/2}, \quad (7.6)$$

где m – число СП, влияющих на j -ый ДП. Формула (7.6) универсальная и справедлива для всех видов функциональной связи ДП и СП, в том числе для регрессионных зависимостей и для отклонений ДП и СП, полученных непосредственно из эксперимента (в последнем случае в (7.4) ∂f заменяется на Δy_j , а ∂x_i - на Δx_i).

Формулы (7.5), (7.6) справедливы для большинства СП, определяющих ресурс структурных элементов машин, так как значения δ_{ij} этих СП не превышают 5-10 %. Если $\delta_{ij} > 10$ %, то необходимо использовать кусочно-линейную аппроксимацию функции f с меньшим шагом. Распространив изложенное на все СЭ рабочих машин (или технологических операций) можно оценить чувствительность технического состояния ОАУ к изменению его i – го СЭ. В соответствии с требованиями надёжности все системы и агрегаты условно разделены на l групп ($l = 2$): обеспечивающие безопасность работ (БР) и функционирование по назначению (ФН). Каждая группа включает некоторое число ρ систем (агрегатов) из общей совокупности R . Техническое состояние r – ой системы характеризуется набором $\vec{v}_r = \{v_{r1}, v_{r2}, \dots, v_{rm}\}$ диагностических параметров, причем $n \leq l$. Последние зависят от $\vec{v}_j = \{v_{j1}, v_{j2}, \dots, v_{jm}\}$ структурных параметров, причем $m \leq l$. Чаще всего требуется знание чувствительности на уровнях A_{ij} или A_{jr} . Для некоторых функций $f(\vec{X}_i)$, связывающих ДП и СП, выражения для чувствительности A_{ij} , а также для погрешности δ_{y_i} , приведены в табл. 7.1.

Полезность измерительной информации, получаемой тем или иным методом, способом или техническим средством, оценивается её достоверностью при заданном рассеивании значений i – го СП, точности измерения и известной зоне допуска на СП: $D_i = 1 - (P_{\alpha i} + P_{\beta i})$, где P_{α} – вероятность ошибок 1-го рода (ложный отказ), т.е. работоспособный СЭ ОАУ бракуется; P_{β} – вероятность ошибок 2-го рода (пропуск отказа, необнаруженный отказ) – при наличии отказа принимается решение о работоспособном состоянии СЭ ОАУ.

Таблица 7.1

№ п/п	Функция $y_j = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$	Чувствительность, Λ_{ij}	Погрешность, δ_{y_i}
1	x_1	1	δ_{x_1}
2	$n x_1, \quad n = const$	1	δ_{x_1}
3	$x_1^n, \quad n = const$	n	$n \delta_{x_1}$
4	$\ln x_1$	$1/\ln x_1$	$\delta_{x_1} / \ln x_1$
5	$n^{x_1}, \quad n = const$	$x_1 \ln n$	$x_1 \delta_{x_1} \ln n$
6	$\sin x_1$	$x_1 \operatorname{ctg} x_1$	$x_1 \delta_{x_1} \operatorname{ctg} x_1$
7	$\cos x_1$	$-x_1 \operatorname{tg} x_1$	$-x_1 \delta_{x_1} \operatorname{tg} x_1$
8	$\operatorname{tg} x_1$	$+2x_1 / \sin 2x_1$	$+2x_1 \delta_{x_1} / \sin 2x_1$
9	$\operatorname{ctg} x_1$	$-2x_1 / \sin 2x_1$	$-2x_1 \delta_{x_1} / \sin 2x_1$
10	$\exp(x_1/n), \quad n = const$	x_1 / n	$x_1 \delta_{x_1} / n$
11	$x_1 \pm x_2 + \dots$	$\Lambda_{1j} = \frac{x_1}{x_1 \pm x_2};$ $\Lambda_{2j} = \frac{x_2}{x_1 \pm x_2}; \dots$	$\left[\sum_{i=1}^n (\Lambda_{ij} \delta_{x_i})^2 \right]^{1/2}$
12	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \dots$	$\Lambda_{1j} = \Lambda_{2j} = \dots = 1$	$\left[\sum_{i=1}^n (\Lambda_{ij} \delta_{x_i})^2 \right]^{1/2}$
13	x_1 / x	1	$\left[\sum_{i=1}^n (\Lambda_{ij} \delta_{x_i})^2 \right]^{1/2}$
14	$x_1(x_2 \pm x_3)$	$\Lambda_{1j} = 1; \Lambda_{2j} = \frac{x_2}{x_2 \pm x_3};$ $\Lambda_{3j} = \frac{x_3}{x_2 \pm x_3};$	$\left[\sum_{i=1}^n (\Lambda_{ij} \delta_{x_i})^2 \right]^{1/2}$
15	$x_1^\alpha \cdot x_2^\beta \cdot x_3^\gamma,$ $\alpha, \beta, \gamma = const$	$\Lambda_{1j} = \alpha; \Lambda_{2j} = \beta; \Lambda_{3j}$	$\left[\sum_{i=1}^n (\Lambda_{ij} \delta_{x_i})^2 \right]^{1/2}$

С другой стороны неправильный выбор ДП, даже при их точном

измерении, может привести к получению ложной информации о состоянии техники. А назначение чрезмерных требований к точности измерения ДП может привести к экономическим потерям от применения измерительных средств.

Например, для СЭ тракторов, автомобилей и других машин установлены двухсторонние зоны допустимых (без замены СЭ) $P_{доп.н}$ и предельных $P_{пр.н}$ значений СП: $P_{пр.н} < P_{доп.н} < P_{ном} < P_{доп.в} < P_{пр.в}$. При этом справедливы следующие продукции (рис.7.1, а):

$$\left\{ \begin{array}{l} - \text{если текущее значение СП } x \in [P_{доп.н}, P_{доп.в}], \\ \text{то СЭ работоспособен;} \\ - \text{если } x \in [P_{пр.н}, P_{доп.н}] \vee x \in [P_{доп.в}, P_{пр.в}], \end{array} \right. \quad (7.7)$$

то СЭ требует замены или восстановления;

$$\left\{ \begin{array}{l} - \text{если } x \notin [P_{пр.н}, P_{пр.в}], \text{ то СЭ неработоспособен.} \end{array} \right.$$

(Здесь знак "V" – дизъюнкция).

Продукцию (7.7) можно записать в другом виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} - \text{если } P(H_1) = \int_{P_{доп.н}}^{P_{доп.в}} f(x) dx, \\ \text{то СЭ и ОАУ в целом работоспособны;} \\ - \text{если } P(H_2) = \int_{P_{пр.н}}^{P_{доп.н}} f(x) dx + \int_{P_{пр.в}}^{P_{доп.в}} f(x) dx = P_н(H_2) + P_в(H_2), \\ \text{то ОАУ неработоспособен из-за того, что его СЭ по} \\ \text{параметру } x \text{ требует восстановления (регулировки);} \\ - \text{если } P(H_3) = \int_{-\infty}^{P_{пр.н}} f(x) dx + \int_{P_{пр.в}}^{\infty} f(x) dx = P_н(H_3) + P_в(H_3), \\ \text{то ОАУ и СЭ неработоспособны.} \end{array} \right. \quad (7.8)$$

Здесь $P(H_1)$ – вероятность события (гипотезы H_1), что текущее значение параметра x находится в пределах $P_{доп.н} < x < P_{доп.в}$; $P(H_2)$ – вероятность события (гипотезы H_2), что $P_{пр.н} < x \leq P_{доп.н}$ или $P_{доп.в} \leq x < P_{пр.в}$; $P(H_3)$ – вероятность события (гипотеза H_3), что $-\infty < x \leq P_{пр.н}$, или $P_{пр.в} \leq x < \infty$. Таким образом, цель экспертизы по-другому: дать возможно более достоверную информацию о возникновении того или иного из указанных событий.

Продукции (7.7) и (7.8) справедливы также при двустороннем допуске на параметры ТП.

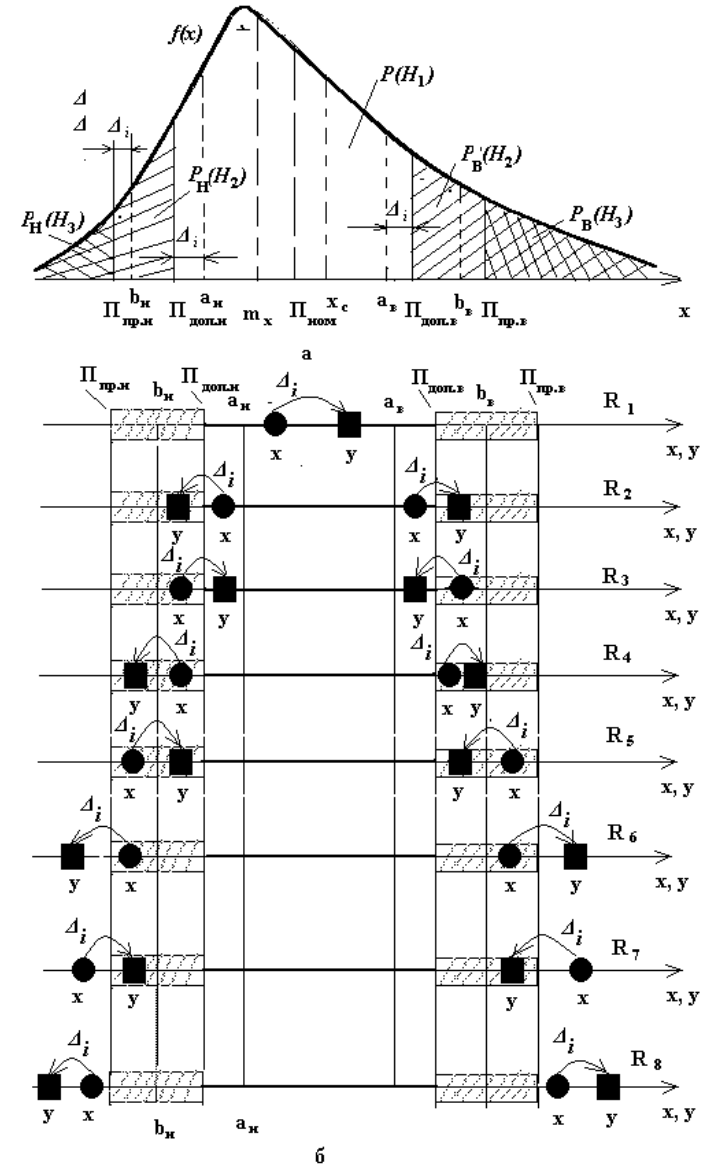


Рис.7.1. Функции распределения и вероятности параметров: а- функция распределения параметра x ; б- вероятности событий появления параметров x и y

При измерении ДП (иногда ДП и СП могут совпадать) возникают погрешности Δ_i , из-за которых вместо x получают значения $y = x \pm \Delta_i$, а вместо граничных параметров $P_{ПР}$ и $P_{ДОП}$ – значения: $a_в = P_{ДОП.в} - \Delta_i$; $a_н = P_{ДОП.н} + \Delta_i$; $в_в = P_{ПР.в} - \Delta_i$; $в_н = P_{ПР.н} + \Delta_i$. Это приводит к тому, что при определении состояния ОАУ будет наблюдаться одно из восьми несовместимых событий R_i , $i = \overline{1,8}$ (табл.7.2, рис.7.1,б).

Таблица 7.2

Событие	Фактическое значение x	Измеренное значение y
R_1	$P_{ДОП.н} < x < P_{ДОП.в}$	$a_н < y < a_в$
R_2	$P_{ДОП.н} < x < P_{ДОП.в}$	$y < P_{ДОП.н}; y > P_{ДОП.в}$
R_3	$x < P_{ДОП.н}; x > P_{ДОП.в}$	$a_н < y < a_в$
R_4	$x < P_{ДОП.н}; x > P_{ДОП.в}$	$y < P_{ДОП.н}; y > P_{ДОП.в}$
R_5	$P_{ПР.н} < x < P_{ПР.в}$	$в_н < y < в_в$
R_6	$P_{ПР.н} < x < P_{ПР.в}$	$y < P_{ПР.н}; y > P_{ПР.в}$
R_7	$x < P_{ПР.н}; x > P_{ПР.в}$	$в_н < y < в_в$
R_8	$x < P_{ПР.н}; x > P_{ПР.в}$	$y < P_{ПР.н}; y > P_{ПР.в}$

События R_1, R_4, R_5, R_8 соответствуют правильным решениям. Вероятность же появления событий R_2, R_3, R_6, R_7 , характеризует недостоверность принятого решения.

Обычно $\Delta_i \ll P_{ДОП.н} - P_{ПР.н}$ и $\Delta_i \ll P_{ПР.в} - P_{ДОП.в}$

(Δ -конъюнкция), а также распределение $f(\Delta)$ – нормальное со средним квадратическим отклонением σ_1 (это присуще аналоговым средствам экспертизы). Тогда получим продукцию:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{если } P_\alpha = I_1 + I_2, \text{ где} \\ I_1 = \frac{\sigma_1}{\sqrt{2\pi}} [f(P_{ПР.н}) + f(P_{ПР.в})] \left\{ \left[\exp\left(-0,5(\Delta_i/\sigma_1)^2\right) - \exp\left(0,5(P_{ПР.в} - P_{ПР.н} - \Delta_i)/\sigma_1\right)^2 \right] + \right. \\ \left. + \sqrt{2\pi} (P_{ПР.в} - P_{ПР.н} - 2\Delta_i)/2\sigma_1 [0,5 + \Phi((P_{ПР.в} - P_{ПР.н} - \Delta_i)/\sigma_1) + \right. \\ \left. + 2\Phi((P_{ПР.в} - P_{ПР.н} - 2\Delta_i)/2\sigma_1) \right] \right\}, \\ I_2 = (\text{аналогично } I_1, \text{ только } P_{ПР.в} \text{ и } P_{ПР.н} \text{ заменяются на } P_{ДОП.в} \text{ и } P_{ДОП.н}), \\ \text{то } y < P_{ПР.н} \vee y > P_{ПР.в} \vee y < P_{ДОП.н} \vee y > P_{ДОП.в}, \text{ при фактическом} \\ \text{нахождении } x \text{ в пределах: } x \in [в_в - в_н] \vee x \in [a_в - a_н]. \end{array} \right. \quad (7.9)$$

Аналогично имеем для ошибки 2-го рода:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{если } P_\beta = f(P_{ДОП.в}) \left\{ \frac{\sigma_1}{\sqrt{2\pi}} \left[\exp\left(-\Delta_i^2/2\sigma_1^2\right) - \exp\left(-(P_{ДОП.в} + \Delta_i)^2/2\sigma_1^2\right) \right] + \right. \\ \left. + (P_{ДОП.в} + \Delta_i) [0,5 - \Phi((P_{ДОП.в} + \Delta_i)/\sigma_1)] - \right. \\ \left. - (\sigma_1/\sqrt{2\pi}) \left[\exp\left(-(P_{ПР.в} - P_{ДОП.в} - \Delta_i)^2/2\sigma_1^2\right) - \right. \right. \\ \left. \left. - \exp\left(-(P_{ПР.в} - \Delta_i)^2/2\sigma_1^2\right) \right] + (P_{ПР.в} + \Delta_i) \cdot \right. \\ \left. \cdot [\Phi((P_{ПР.в} - \Delta_i)/\sigma_1) - \Phi((P_{ПР.в} - P_{ДОП.в} - \Delta_i)/\sigma_1)] - \right. \\ \left. - P_{ДОП.в} [0,5 - \Phi((P_{ПР.в} - P_{ДОП.в} - \Delta_i)/\sigma_1)] \right\} + \\ + f(P_{ПР.в}) \left\{ (\sigma_1/\sqrt{2\pi}) \exp\left(-\Delta_i^2/2\sigma_1^2\right) - \right. \\ \left. - \Delta_i [0,5 - \Phi(\Delta_i/\sigma_1)] - (\sigma_1/\sqrt{2\pi}) \exp\left(-(P_{ПР.в} - P_{ДОП.в} - \Delta_i)^2/2\sigma_1^2\right) + \right. \\ \left. + (P_{ПР.в} - P_{ДОП.в} - \Delta_i) [0,5 - \Phi((P_{ПР.в} - P_{ДОП.в} - \Delta_i)/\sigma_1)] \right\}, \\ \text{то } y \in [a_н, a_в] \vee y \in [в_н, в_в] \text{ при фактическом нахождении } x \\ \text{за пределами } P_{ПР.в} - P_{ПР.н} \text{ (или } P_{ДОП.в} - P_{ДОП.н}): x < P_{ДОП.н} \vee x \\ > P_{ДОП.в} \vee x < P_{ПР.н} \vee x > P_{ПР.в}. \end{array} \right. \quad (7.10)$$

Продукции (7.9) и (7.10) справедливы для любого закона распределения погрешности измерений.

При одностороннем допуске на СП технологического процесса (это также характерно для износов в сопряжениях машин) продукция (2.12) упрощается:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{если } P_\alpha = (\sigma_1/\sqrt{2\pi}) [f(P_{ПР.в}) + f(P_{ДОП.в})] \left\{ \exp\left(-\Delta_i^2/2\sigma_1^2\right) - \right. \\ \left. - \exp\left(-(P_{ПР.в} - P_{ДОП.в} - \Delta_i)^2/2\sigma_1^2\right) \right\} + \left[\sqrt{2\pi} (P_{ПР.в} - P_{ДОП.в} - 2\Delta_i)/2\sigma_1 \right] \cdot \\ \cdot [0,5 + \Phi((P_{ПР.в} - P_{ДОП.в} - \Delta_i)/\sigma_1) + 2\Phi((P_{ПР.в} - P_{ДОП.в} - 2\Delta_i)/2\sigma_1)], \\ \text{то } y > P_{ДОП.в} \vee y > P_{ПР.в} \text{ при фактическом нахождении } x \text{ в} \\ \text{пределах: } x \in [P_{ном}, a_в] \vee x \in [P_{ном}, в_в]. \end{array} \right. \quad (7.11)$$

В формулах (7.9)–(7.11) $\Phi(z)$ – функция Лапласа:

$$\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-x^2} dx.$$

Анализ продукций (7.9) – (7.11) показывает следующее.

1. Изменение $P_{ПР}$ и $P_{ДОП}$ значительно сильнее влияет на значение P_β , чем на P_α , причём с уменьшением зон $[P_{ПР.в}, P_{ПР.н}]$ и $[P_{ДОП.н}, P_{ДОП.в}]$ величина P_α возрастает, а P_β снижается.
2. Изменение Δ_i сильнее сказывается на P_α , чем на P_β .
3. Если $P_{ПР.в}/\sigma_1$ (или $P_{ДОП.в}/\sigma_1$) $\gg 1$, то $P_\alpha/P_\beta \geq 2-10$.
4. Если $f(x)$ в пределах $P_{ПР.в} - P_{ДОП.в}$ или $P_{ДОП.н} - P_{ПР.н}$ изменя-

ются незначительно, то $D \approx 1 - (2\sigma_1/\sqrt{2\pi}) [f(P_{ПР\phi}) + f(P_{ДОП\phi})]$. При оценке достоверности измерительной информации необходимо решить следующие задачи.

1. Оценить достоверность D_r (или P_{ar} и $P_{\beta r}$) определения текущего состояния ТП, а также оборудования (машины, агрегата, системы) по заданным (известным) достоверностям D_j измерения отдельных j -х ДП (прямая общая задача).

2. Получить требуемую достоверность D_j измерения отдельных j -ых ДП при заданной достоверности D_r определения текущего состояния ТП и оборудования (обратная общая задача).

3. Оценить достоверность D_{ij} определения i -го СП по известной достоверности D_j измерения j -го ДП (прямая частная задача).

4. Получить требуемую достоверность D_j измерения j -го ДП при заданной (известной) достоверности D_{ij} определения текущего состояния i -го СЭ (обратная частная задача).

Первая общая задача формулируется так:

$$D_r = \prod_{j=1}^N D_j, \text{ или} \quad (7.12)$$

$$\begin{cases} P_{ar} = 1 - \prod_{j=1}^N (1 - P_{aj}), \\ P_{\beta r} = 1 - \prod_{j=1}^N (1 - P_{\beta j}). \end{cases} \quad (7.13)$$

При использовании (7.12) и (7.13) предполагается, что если в результате измерения хотя бы один j -ый ДП находится вне зоны допуска, то весь ОАУ (ТП и оборудование) не допускается к выполнению своих функций. Кроме того, полагается, что с помощью j -го ДП проверяется работоспособность непересекающихся СЭ (j -ые ДП независимы). Если обнаружение одного и того же отказа осуществляется несколькими ДП, то использовать формулу (7.13) для P_{ar} нельзя, однако это условие не распространяется на вероятность $P_{\beta r}$.

Вторая общая задача относится к задаче многопараметрического контроля. Для случая идентичности P_α и P_β по отдельным j -ым ДП: $P_{\alpha 1} = P_{\alpha 2} = \dots = P_{\alpha j} = \dots = P_{\alpha N}$; $P_{\beta 1} = P_{\beta 2} = \dots = P_{\beta j} = \dots = P_{\beta N}$, разработаны номограммы определения $P_{aj} = f_\alpha(D)$ и $P_{\beta j} = f_\beta(D)$. Однако такое решение, например, при оценке технического состояния машин некорректно, так как при этом неоправданно завышаются точностные показатели одних ДП и занижаются других. Это объясняется тем, что различные ДП по-разному отражают текущее состояние ОАУ: более весомые (важные) ДП, т.е. с большей чувствительностью S_{jr} , должны

измеряться более точно. Поэтому используют коэффициент функциональной весомости (важности) W_j j -го ДП:

$$W_j = \frac{\sum_{\rho=1}^{r \leq R} |S_{j\rho}|}{\sum_{\rho=1}^{r \leq R} \sum_{j=1}^{n \leq N} |S_{j\rho}|} \quad \text{при} \quad \sum_{j=1}^N W_j = 1 \quad (7.14)$$

Очевидно, чем больше W_j , тем более информативен данный ДП, т.е. его применение более значимо отражает текущее состояние ОАУ.

Так как суммарная вероятность неверного решения (ошибки) в определении состояния ОАУ (ТП, агрегата, машины, системы и т.д.) равна $P_{nr} = P_{ar} + P_{\beta r}$, то $P_{nr} = 1 - D_r$ и $P_{nr} \geq P_{nj}$ из-за того, что $D_r \leq D_j$, где $P_{nj} = 1 - D_j$ – суммарная вероятность неверного решения (ошибки) при экспертизе ОЭ по j -му ДП. Для учета W_j при определении P_{nj} вводится функция веса $B_j = f_j(W_j)$:

$$P_{nj} = P_{nr} B_j, \quad (7.15)$$

$$\text{где } B_j = \left[W_j \sum_{j=1}^N (1/W_j) \right]^{-1}, \quad (7.16)$$

причем $B_j \leq 1$; $\sum_{j=1}^N B_j = \sum_{j=1}^N W_j = 1$, кроме того при $W_l > W_k$ имеем $B_l <$

B_k . С учетом изложенного, достоверность измерения j -го ДП равна:

$$D_j = 1 - (1 - D_r) B_j, \quad (7.17)$$

а для ОАУ в целом (ТП, агрегата, машины, системы и т.д.):

$$D_r = 1 - (1 - D_j) B_j. \quad (7.18)$$

Требования к возникновению ошибок 1-го и 2-го рода при измерении j -го ДП определяются так:

$$\begin{cases} P_{aj} = P_{ar} B_j, \\ P_{\beta j} = P_{\beta r} B_j. \end{cases} \quad (7.19)$$

Пример решения 2-й (общей) задачи. Необходимо определить требования к достоверности измерения параметров дизеля ЯМЗ–238 измерительной экспертной системой (табл. 7.3).

Оценка технического состояния дизеля должна осуществляться с достоверностью не ниже 85%, т.е. $P_{nr} \leq 0,15$. Задаем $P_{ar} \leq 0,1$, $P_{\beta r} \leq 0,05$. По формулам (7.16) – (7.19) рассчитываются для всех ДП значения P_{aj} , $P_{\beta j}$, P_{nj} , которые заносим в табл. 7.3. Как видно из таблицы, для обеспечения требуемой достоверности получаемой экспертной информации по двигателю в целом, погрешности измерений значений отдельных ДП не должны появляться с вероятностью более чем $(5-6)10^{-3}$.

Таблица 7.3

№ п/п	ДП	A_{jr}	W_j	P_{aj}	$P_{\beta j}$	$P_{nj} \cdot 10^{-3}$
1	Давление масла в магистрали	0,68	0,175	0,003	0,002	5
2	Расход масла	0.62	0.159	0.004	0.002	6
3	Удельный расход топлива	0.18	0.046	0.014	0.007	2.1
4	Угол опережения впрыска топлива	0.40	0.103	0.006	0.003	0.9
5	Дымность ОГ	0.40	0.103	0.006	0.003	0.9
6	Прорыв газов в картер	0.38	0.098	0.007	0.003	1
7	Температура ОГ	0.21	0.054	0.012	0.006	1.8
8	Эффективная мощность	0.10	0.026	0.030	0.015	4.5
9	Индикаторное давление	0.15	0.039	0.016	0.008	2.4
10	Давление топливоподачи	0.51	0.130	0.006	0.003	0.9
11	Виброакустические показатели впрыска топлива	0.26	0.067	0.009	0.005	1.4
		3,89	1,0			

Для решения частных задач (3-ей и 4-ой) необходимо ввести коэффициент функциональной весомости i -го СП в множестве N ДП:

$$W_i = \frac{\sum_{\rho=1}^{r \leq R} \sum_{j=1}^{n \leq N} \Lambda_{ij\rho}}{\sum_{\rho=1}^{r \leq R} \sum_{j=1}^{n \leq N} \sum_{i=1}^{m \leq M} \Lambda_{ij\rho}}, \quad (7.20)$$

где $\sum_{i=1}^N W_i = 1$; M – множество СП по ОАУ в целом.

Неравенства $m \leq M$ и $n \leq N$ означают, что не каждый j -ый ДП чувствителен к каждому i -му СП. Если бы ДП определялся только одним СП (т.е. $W_i = 1$), то $D_{ij} = D_j$. Поскольку j -ый ДП отражает $m \leq M$ СП, то $D_{ij} < D_j$:

$$D_{ij} = D_j Q_{ij}, \quad (7.21)$$

где $Q_{ij} \leq 1$ – вероятность определения состояния i -го СЭ по j -му ДП, которая зависит от W_i . Вероятность ошибки в определении со-

стояния i -го СЭ, вызванная только составляющей Q_{ij} , будет равна:

$$P_{n,ij} = 1 - Q_{ij}. \quad (7.22)$$

В общем случае $P_{nij} < P_{nj}$. Аналогично (7.15) введём функцию веса $B_i = f_i(W_i)$:

$$P_{n,ij} = P_{nj} B_i, \quad (7.23)$$

где $B_i = (1/W_i) \left(\sum_{i=1}^m 1/W_i \right)$ удовлетворяет тем же условиям, что и

функция (7.16). Тогда достоверность измерения, обеспечивающая требуемое значение D_{ij} определения технического состояния i -го СЭ равна:

$$D_{ij} = D_j [1 - (1 - D_j) B_i]; \quad (7.24)$$

$$D_j = \frac{B_i - 1}{2B_i} + \left[\frac{(1 - B_i)^2}{4B_i^2} + \frac{D_{ij}}{B_i} \right]^{1/2}. \quad (7.25)$$

При расчете D_j необходимо подставлять в (7.25) минимальное значение B_i , соответствующее СП с $(A_{ij})_{min}$. Это обеспечивает достоверность определения состояния наименее влияющего СЭ на заданном уровне D_{ij} . Соответственно достоверность определения состояния других СЭ с большим i и значениями A_{ij} будет выше.

Пример решения третьей и четвертой (частных) задач.

Исходя из требуемой достоверности $D_{ij} = 0,95$ определения технического состояния втулки поворотной цапфы, определить требование к точности и достоверности измерительной информации, если ДП – зазор между шкворнем и втулкой поворотной цапфы. При этом диаметр шкворня находится в пределах $37,983 \div 38,000$ мм, а втулки $38,025 \div 38,060$ мм; допустимый диаметр шкворня – $37,97$ мм; втулки – $38,08$ мм.

Исходя из условия, предельное отклонение зазора (эксплуатационный зазор) не должно превышать $\Pi_{npj} = 38,08 - 37,97 = 0,11$ мм. При этом допускаемое отклонение на размер шкворня с учётом технологического допуска составляет $\Delta_{доп.ш} = 38,00 - 37,97 = 0,03$ мм; а втулки $\Delta_{доп.в} = 38,080 - 38,025 = 0,055$ мм. Тогда класс точности СП для шкворня и втулки по (7.2) при $n = 3$:

$$\delta_{ш} = \frac{0,03 \cdot 100}{2 \cdot 0,11 \cdot (1,6)^3} = 3,33 \%; \quad \delta_{в} = \frac{0,055 \cdot 100}{2 \cdot 0,11 \cdot (1,6)^3} = 6,11 \%.$$

Известно, что в эксплуатации скорость износа шкворня в 3,62 раза выше, чем втулки, поэтому на его долю приходится $\Delta \Pi_{np,ш} = 0,11 - 0,11/3,62 = 0,08$ мм, на долю втулки $-\Delta \Pi_{np,в} = 0,03$ мм. Тогда чувствительность, в соответствии с (7.4), составит:

$$L_{ш} = 0,08/0,11 = 0,73; \quad L_{в} = 0,03/0,11 = 0,27, \text{ а требуемая приве-}$$

дѣнная погрешность измерения ДП (согласно (7.6)) равна:

$$\delta_j = \left[3,33^2 \cdot 0,73^2 + 6 \cdot 11^2 \cdot 0,27^2 \right]^{1/2} = 2,94 \% .$$

По формуле (7.20) вычисляем коэффициенты W_i :

$$W_{uu} = \frac{0,73}{0,73+0,23} = 0,73; \quad W_e = \frac{0,27}{0,73+0,27} = 0,27; \quad \sum_{i=1}^2 W_i = 1,0; \quad \sum_{i=1}^2 \frac{1}{W_i} = 5,07.$$

При $W_{min} = W_b = 0,27$, и принимая $D_{ij} = D_b = 0,95$, имеем:

$$B_{ib} = \frac{1}{0,27 \cdot 5,07} = 0,73; \quad D_j = \frac{0,27}{2 \cdot 0,73} + \left[\frac{0,27^2}{4 \cdot 0,73^2} + \frac{0,95}{0,73} \right]^{1/2} = 0,97.$$

Следовательно, для обеспечения достоверности $D_b = 0,95$ определения технического состояния втулки экспертизу необходимо осуществлять с достоверностью не хуже $D_j = 0,97$. При этом достоверность оценки состояния шкворня с учетом $B_{iu} = \frac{1}{0,73 \cdot 5,07} = 0,27$, согласно (7.24), будет не ниже

$$D_{iu} = \left(1 - \frac{1-0,97}{0,73 \cdot 5,07} \right) 0,97 = (1 - 0,008) 0,97 = 0,96.$$

Таким образом, при заданных условиях эксплуатации экспертиза шкворневого соединения по зазору шкворень–втулка должна проводиться с погрешностью не хуже $\pm 3 \%$ при достоверности 0,97.

Как видно из примера, формулы для решения прямой (7.24) и обратной (7.25) частных задач экспертизы позволяют успешно решать задачи многопараметрического контроля.

7.2. Обоснование набора информативных косвенно измеряемых (диагностических) параметров

Выбор информативных косвенно измеряемых (диагностических) параметров (ДП) оборудования производится с учётом их изменения в эксплуатации (качество выполнения технологических операций, в определённой мере, также зависит от наработки оборудования). При выборе вектора ДП основной критерий – информативность отдельных параметров. С ростом наработки ОАУ значение информативного ДП изменяется. Учёт изменения информативности ДП связан с понятием энтропии состояния:

$$H_c = -P(T_n) \log_2 P(T_n) \text{ бит} , \quad (7.26)$$

где $P(T_n)$ – вероятность безотказной работы ОАУ в зависимости от наработки T_n . Количество информации, содержащееся в ДП, не может

превысить значения, определяемого по формулам (6.5), (7.2):

$$I(x) = \log_2 \left\{ \frac{\Pi_{ДП,j}}{\Delta \Pi_{СП,j}} (\varphi_r)^n \right\} \text{ бит} , \quad (7.27)$$

или в общем виде, с учётом (7.3):

$$I(x) = \log_2 \left\{ \frac{m_{ij} (\varphi_r)^n}{\gamma_{rij}} \cdot 100 \right\} = \log_2 \left\{ \frac{m_{ij} (1,6)^n}{\gamma_{rij}} \cdot 100 \right\} \text{ бит} . \quad (7.28)$$

В качестве обобщѐнного показателя информативности K_I , учитывающего информативность ДП, точность и достоверность измерения СП, а также изменение информативности ДП с ростом наработки, может использоваться величина:

$$K_I = I(x) H_c = \log_2 \left\{ \frac{\Pi_{ДП,j}}{\Delta \Pi_{СП,j}} (\varphi_r)^n \right\} [-P(T_n) \log_2 P(T_n)] \text{ бит}^2 \quad (7.29)$$

или

$$K_I = \log_2 \left\{ \frac{m_{ij} (1,6)^n}{\gamma_{rij}} \cdot 100 \right\} [-P(T_n) \log_2 P(T_n)] \text{ бит}^2 . \quad (7.30)$$

Показатель (7.29) или (7.30) является мерой информативности при сравнительной оценке ДП. Значение $K_{I,min}$ является базой для формирования вектора (набора) ДП. Методика формирования этого вектора заключается в следующем:

1) при заданной наработке T_n рассчитываются значения K_{Ij} для всех N ДП, характеризующих состояние ОАУ (трактора, автомобиля, комбайна, агрегата, машины, системы и т.д.);

2) значения K_{Ij} ранжируются в возрастающем порядке;

3) выбирается m первых ДП в соответствии с критерием (продукцией):

если $\sum_{j=1}^m K_{Ij} = (1,0 \div 1,1) N K_{I,min}$,
то вектор ДП $\vec{y}_m = \{y_1, \dots, y_m\}$ является наиболее информативным;

4) для разнотипных r систем выбирается m первых ДП в соответствии с критерием (продукцией):

если $\varepsilon = \sum_{j=1}^m K_{Ij} = (1,0 \div 1,1) \sum_{j=1}^r N K_{I,min}$,
то вектор ДП $\vec{y}_m = \{y_1, \dots, y_m\}$ является наиболее информативным.

Таким образом, величина ε может служить обобщённым показателем информационной надёжности определения состояния ОАУ. Информативность ДП является переменной величиной, зависящей от наработки ОАУ.

Полезность измерительной информации определяется достоверностью и точностью её результатов. Точность измерения обусловлена требуемой достоверностью измерительных операций и прогнозирования текущего состояния ОАУ с учётом статистической информации о распределении ДП и погрешностей его измерений. Достоверность, в свою очередь, зависит от точности технических средств измерений, методов измерений, эффективности выбора ДП, эксплуатационного допуска на них, функционального "веса" СП в ОАУ, показателей надёжности ОАУ, в том числе и наработки оборудования.

Управление полезностью измерительной информации заключается в обоснованном выборе ДП, обеспечивающих приемлемую точность и достоверность этой информации. При этом необходимо решить ряд частных задач: определить точность методов измерений, их достоверность, точность технических средств для измерения каждого i -го ДП, точность прогнозирования состояния, достоверность прогноза остаточного ресурса оборудования и т.д.

С точки зрения измерения ДП все показатели можно разделить на метрологические показатели и эксплуатационные показатели:

$$\bar{P}_M = \left\{ D_{ij}, \delta_j, \delta_{Mj}, \delta_{cu,j}, \delta_{np,j}; \Delta P_{ДПj}, f_{\Delta}(y), f_{ДП}(y), \sigma_{\Delta}^2 \right\},$$

$\bar{P}_{\varepsilon} = \left\{ f_{\Delta}(x); f_{cn}(x); \sigma_{cn}^2; P_{cn,np}; \Delta P_{cn,don}; N; T_n \right\}$, где δ_j – погрешность экспертизы; δ_{Mj} – погрешность метода измерения j -го ДП; $\delta_{cu,j}$ – погрешность средства измерения j -го ДП; $\delta_{np,j}$ – погрешность прогнозирования состояния ОАУ; $\Delta P_{ДПj}$ – допуск на результат измерения j -го ДП; $f_{\Delta}(y)$ – дифференциальный закон распределения вероятности (ДЗРВ) погрешности измерения j -го ДП; $f_{ДП}(y)$ – ДЗРВ значений j -го ДП; $f_{\Delta}(x)$ – ДЗРВ погрешности измерений i -го СП; $f_{cn}(x)$ – ДЗРВ значений i -го СП; σ_{Δ}^2 и σ_{cn}^2 – дисперсии погрешности измерений j -го ДП и i -го СП; $P_{cn,np}$ – предельное значение i -го СП; $\Delta P_{cn,don}$ – допустимое отклонение i -го СП; N – число измеренных СП; T_n – наработка оборудования ОАУ.

Предельное значение $P_{cn,np}$ i -го СП приводится в нормативной документации (назначается или выбирается по технико-экономическому критерию или по критерию требуемой вероятности безотказной работ). Допускаемое отклонение $\Delta P_{cn,don}$ j -го СП и наработка T_n назначаются в нормативной документации в зависимости от

$P_{cn,np}$. Поскольку $D = f(P_{cn,np}, \Delta P_{cn,don} \text{ и } T_n)$, то с учетом этих критериев можно управлять полезностью измерительной информации. Действительно, исходя из физической природы эксплуатационного изменения i -го СП, до некоторой наработки T_{nl} точность операций измерения не имеет существенного значения, так как при $T_n < T_{nl}$ значение i -го СП ещё значительно отличается от $P_{cn,np}$ и даже без контроля с высокой вероятностью можно обеспечить безотказность СЭ. Значение $D_{ij} = D_{ij,max}$ должно быть обеспечено в области T_n , при которых значение i -го СП близко к допустимому и предельному значениям, так как принимаемое решение о годности оборудования ОАУ к эксплуатации связано с ошибками 1-го и 2-го рода, что приводит к росту издержек. Из-за изменения показателей ДЗРВ i -го СП с ростом наработки, для обеспечения требуемого значения D_{ij} , методы и средства измерений должны иметь различные показатели точности при различной наботке оборудования.

Установлено, что ДЗРВ значений СП машин чаще всего является нормальным или описывается законом Вейбулла, а погрешности измерения ДП описываются нормальным или равномерным ДЗРВ. С учётом вышеизложенного, требования к точности средств измерений должны формироваться исходя из реальных значений $T_{n,max}$ или из значений $T_n \{ [f_{cn}(x)]_{max} \}$, соответствующих области максимальных значений ДЗРВ i -го СП $[f_{cn}(x)]_{max}$.

Тема седьмая
ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ (ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УПРАВЛЯЮЩИЕ)

7.1. Принципы построения и функционирования экспертных систем

Экспертные системы (системы автоматизации с искусственным интеллектом) - используют опыт, накопленный при разработке и эксплуатации объекта экспертизы (ОЭ) или объекта автоматического управления (ОАУ). Основу экспертных систем (ЭС) составляют базы знаний и механизмы работы с ними. ЭС воплощают в ЭВМ опыт человека-эксперта, основанный на знаниях, в такой форме, что машина может дать интеллектуальный совет или принять интеллектуальное решение (термины по ЭС приведены в приложении 2).

Измерительные ЭС (ИЭС) оперируют, в отличие от обычных информационно-измерительных систем (ИИС) не только базой данных (количественными величинами), но и понятийными, концептуальными знаниями, выраженными на естественном языке в терминах предметной области (т.е. совокупностью сведений о количественных и качественных характеристиках ОЭ, а также знаниями относительно стоящих за этими терминами классов состояний и их отношений). Экспертные системы способны строить логические выводы, и на их основе делать обобщения и заключения, вызывать ассоциации. Использование в экспертной системе только знаний из определенной предметной области позволяет отказаться от сложных универсальных методов решения задач, что резко повышает производительность, упрощает структуру построения системы и повышает достоверность идентификации состояния испытуемого объекта.

Особенностью *измерительных управляющих ЭС (ИУЭС)* является необходимость работы в реальном времени в процессе сбора информации с объекта (эту задачу решает ИИС - обязательная составная часть ИУЭС), а в ряде случаев и оперативное управление ОАУ с целью задания требуемых режимов работы и исключения критических и аварийных ситуаций. Кроме того, отсутствует в общем виде четкая логика принятия решения об отнесении состояния ОАУ к тому или иному классу; можно говорить только о каких-то диапазонах существования ряда параметров и областях существования физических процессов, характеризующих работу ОАУ. Следовательно, необходимо дать формализованное описание алгоритмов оценки состояния ОАУ хотя бы в каких-либо узких областях, при

анализе только некоторых моделей физических процессов.

Сложный технологический процесс (ТП) представлен, как правило, совокупностью взаимосвязанных, разнородных по физическим, химическим и биологическим принципам, операций. Каждая из них, в свою очередь, зависит от структурных параметров, характеризующих рабочие процессы. Незначительное изменение одного из структурных параметров вызывает сложное причинно-следственное воздействие на ход рабочих процессов и на поведение информативных признаков (сигналов), отражающих эти процессы. Обеспечение оптимальных параметров ТП (т.е. ОЭ или ОАУ), а также поддержание оборудования в работоспособном состоянии невозможно без достоверной информации о параметрах рабочих процессов и характеристиках систем анализа информационных потоков, отражающих состояние ОЭ или ОАУ. Решение этих задач возможно только при автоматизации измерительных и вычислительных процедур, создании систем анализа информационных потоков, характеризующих быстропротекающие рабочие процессы и параметры работы систем и механизмов машин.

Процесс функционирования ИЭС и ИУЭС определяется целью их создания и ресурсами (ограничениями). *Предметной областью ИЭС и ИУЭС* являются знания о процессах функционирования и контроля состояния ОЭ (ОАУ). *Проблемная область ИЭС и ИУЭС* включает предметную область и комплекс задач, решаемых в этой области: определение состава знаний, организация знаний, представление знаний. Для функционирования ИЭС и ИУЭС необходимы следующие знания:

- о физических процессах и информативных признаках, отражающих состояние ОЭ (ОАУ) и служащие для создания его модели;
- о способах извлечения информации об объекте (преобразовании и обработке входной информации);
- о методах, необходимых для идентификации ОЭ (ОАУ) с моделью (оценки степени их близости);
- о процессе решения задачи, используемые решающим устройством (интерпретатором) для вынесения экспертных заключений;
- о форме представления экспертных заключений;
- о структурных и управляющих алгоритмах и программах, поддерживающих функционирование системы.

Важной компонентой ИЭС и ИУЭС является база знаний, в которой аккумулируются следующие знания:

- 1) какие имеются литературные, методические, нормативные и программные материалы, относящиеся к процессам функционирования ОЭ (ОАУ) и определения его состояния;

2) какова природа обрабатываемых данных и какая модель наиболее подходит как для ОЭ (ОАУ) в целом, так и для его составных частей;

3) какие методы обработки информации, снимаемой с датчиков, наиболее эффективны, в чём их сущность, каковы особенности и сфера их применения;

4) какова должна быть технологическая цепочка процедур и алгоритмов, составляющих основную обрабатывающую программу;

5) как интерпретировать промежуточные и конечные результаты измерений, как их анализировать, каковы должны быть корректирующие и управляющие команды при анализе предметной области;

6) каковы наиболее целесообразные формы представления результатов экспертного анализа.

На всех этапах создания базы данных и организации работы интерпретатора необходимо осуществлять классификацию многомерных информационных потоков (разбиение совокупности состояний объекта или его составных частей на однородные классы состояний). Кроме того, необходим переход от широкого набора признаков сигналов, характеризующих объект, к небольшому числу определяющих (обобщенных) факторов-детерминантов, т.е. необходимо снижение размерности информационных потоков и выбор метрики в пространстве наиболее информативных признаков-детерминантов. Качество дальнейшей классификации в этом пространстве будет существенно зависеть от выбранного метода нахождения расстояния между классами (метода принятия решения интерпретатором). При выборе указанного метода требуется обосновать пространство действий (операторов), которые можно применить, налагаемые ограничения, а также функцию потерь (риска), необходимую для нахождения оптимального решения задачи. С точки зрения интерпретатора при классификации многомерных информационных потоков, отражающих состояние объекта, вся процедура разработки ИЭС и ИУЭС может быть разбита на этапы:

1) постановочный (предметно-содержательное формулирование цели испытания), отбор типа решаемых прикладных задач: выявление наиболее информативных признаков, сжатие исходных данных, визуализация многомерных данных, построение условного координатного пространства, в терминах переменных которого удобно описываются и отражаются анализируемые свойства объекта;

2) априорный математико-постановочный (выбор базовой математической модели механизма генерации исходных данных объекта);

3) подготовительно - информационный (составление плана и методик сбора исходной информации, ее предварительная обработка для ввода в ЭВМ);

4) аналитический (применение специальных методов обработки исходных данных для получения частных и обобщенных признаков-детерминантов: временной, частотной и фазовой селекции; сглаживания, дифференцирования и т.д.);

5) апостериорный математико-постановочный (корректировка при необходимости выбранной базовой модели объекта или его составных частей, с учетом полученных опытных данных);

6) вычислительный (реализация на ЭВМ задач, поставленных на первых двух этапах);

7) итоговый (визуализация результатов испытаний и экспертных заключений, формулирование выводов о дальнейшей судьбе объекта или его составных частей).

При детализации технического обеспечения ИЭС и ИУЭС необходимо определить показатели назначения, обеспечивающие выполнение поставленной цели: номенклатуру измеряемых физических величин (измерительных каналов); номенклатуру и тип датчиков, а также исполнительных органов (при необходимости); информационные показатели исходных данных и интерфейса (объем, быстродействие и др.); структуру интерфейса; метод и структуру селекции сигнала и фильтрации помех; структуру применения специальных методов анализа; методы и средства визуализации результатов. Для создания технического обеспечения ИЭС и ИУЭС нужна также разработка прикладных программ и методик метрологического обеспечения. Типовая экспертная система (рис. 7.1) имеет следующие компоненты:

1) базу знаний, хранящую множество правил;

2) рабочую память, хранящую данные (базу данных);

3) интерпретатор, решающий на основе имеющихся в системе знаний предъявленную ему задачу;

4) компоненту диалогового взаимодействия с пользователем (экспертом) на естественном для него языке;

5) компоненту приобретения знаний;

6) объяснительную компоненту, дающую объяснения действий ИЭС и ИУЭС и отвечающей на вопросы о том, по какой причине некоторые заключения были сделаны или отвергнуты.

Экспертная система работает в двух режимах: в режиме приобретения знаний и в режиме решения задач. В режиме приобретения знаний в общении с экспертной системой участвует эксперт (через посредство инженера по знаниям). В этом режиме эксперт наполняет

систему знаниями (правилами), которые позволят ей в режиме решения самостоятельно решать задачи из области экспертизы. В режиме решения задач в общении с системой участвует пользователь (которого интересует результат и (или) способ получения решения) и ОЭ (ОАУ).

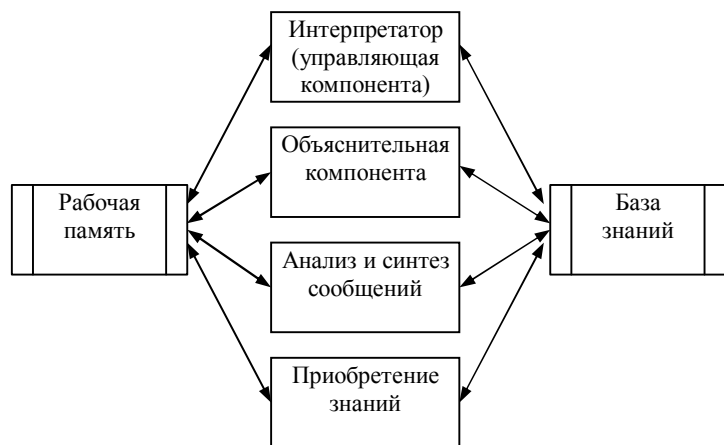


Рис. 7.1. Обобщенная схема типовой экспертной системы

В выработке решений участвует база знаний (БЗ) и механизм логического вывода (МЛВ), а качество определяется тем, насколько хорошо развитой является БЗ. В настоящее время разработчики ЭС во многих случаях получают готовые МЛВ, встроенные в те или иные инструментальные «оболочки». Задача реализации ИЭС и ИУЭС сводится к приобретению знаний о конкретной прикладной области. Под приобретением знаний для ИЭС и ИУЭС понимается следующее:

- 1) отбор и анализ знаний, касающихся конкретной прикладной области;
- 2) преобразование знаний к формату, позволяющему МЛВ оперировать с этими знаниями;
- 3) поддержка и контроль совместимости (непротиворечивости) и достоверности приобретенных знаний.

В ИЭС и ИУЭС при решении задач анализа предметной области целесообразно использовать качественные и количественные признаки физических, химических и биологических процессов, оп-

ределяющих общее состояние ОЭ (ОАУ): явные дефекты составных элементов, обнаруживаемые внешним осмотром; качественные признаки, характеризующие явные отклонения от нормального функционирования, обнаруживаемые органо-лептическими методами (визуально, наощупь, по запаху и т.п.); точные количественные обобщенные показатели (производительность, расход сырья, энергии и топлива, ускорение и замедление валов рабочих машин, транспортных средств и т.д.).

Создание базы знаний заключается в выполнении следующих действий:

1) ранжирование структурных параметров $\{q_{ij}\}$ ОЭ (или ОАУ) по приоритетности с учетом весомости каждого отказа (отклонения от нормы) и их классификация на группы, определяющие:

- качество рабочих процессов $\{q_{pj}\}$;
- технологический и технический ресурс $\{q_{mk}\}$;
- потребность в проведении подготовительных (установочных), регулировочных и очистительно-смазочных операций $\{q_{cm}\}$, причем $\{q_{ij}\} = \{q_{pj}\} \vee \{q_{mk}\} \vee \{q_{cm}\}$, где \vee – знак объединения (дизъюнкция); $j = \overline{1, I}$; $k = \overline{1, K}$; $m = \overline{1, M}$;

2) определение обобщенных показателей, характеризующих качество протекания рабочих процессов и состояние ОЭ (или ОАУ) в целом, а также допустимых пределов их изменения (с индексами “н” и “в” – нижняя и верхняя границы):

$$\begin{cases} \{Q_{oi}\} = \{Q_{pj}(\varphi_{pj}\{q_{pj}\})\} \vee \{Q_{mk}(\varphi_{mk}\{q_{mk}\})\} \vee \\ \vee \{Q_{cm}(\varphi_{cm}\{q_{cm}\})\}; \\ \{Q_{oi}\}_n < \{Q_{oi}\} < \{Q_{oi}\}_v. \end{cases}$$

3) обоснование векторов учитываемых воздействий среды на объект \vec{X} , объекта на среду \vec{V} (множество физических процессов, отражающих состояние объекта и его переход из одного состояния в другое), вектора управляющих воздействий \vec{U} , а также косвенных параметров (временных, частотных, фазовых и скоростных характеристик, их частных и обобщенных показателей), т.е. нахождение векторов \vec{S}_x и \vec{S}_y ;

4) разработка алгоритмов извлечения достоверной информации о состоянии объекта, идентификации с моделью, интерпретации (принятия решения) результатов анализа и выдачи экспертных заключений.

Знания для экспертной системы могут приобретаться несколькими путями, каждый из которых предусматривает перенос компетентности, необходимой для высококачественного проведения экспертизы, от источника знаний в программу (рис.7.2).

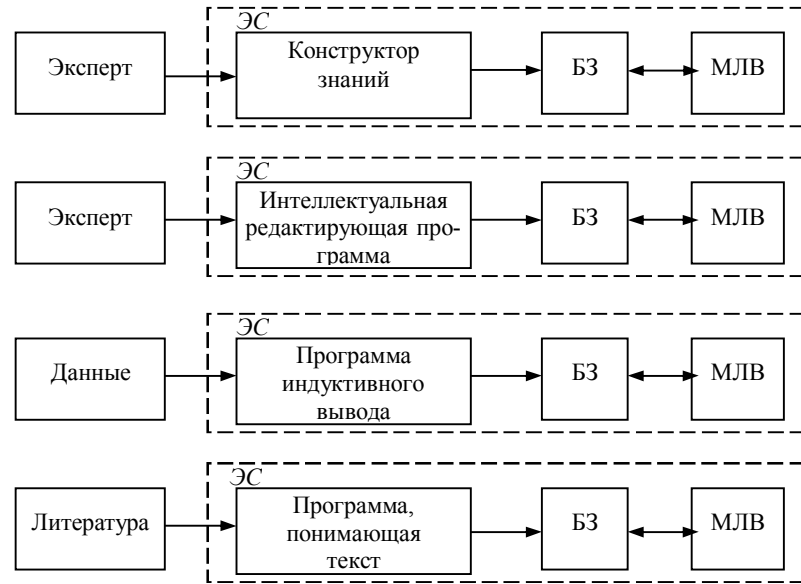


Рис.7.2. Пути приобретения знаний экспертной системой (МЛВ – механизм логического вывода)

Инженер знаний взаимодействует с экспертом или использует известные данные для переноса их в ИЭС (ИУЭС). Взаимодействие инженера знаний с ЭС может осуществляться с помощью ее компоненты программы – конструктора знаний (рис.7.2,а), которая генерирует для насыщения базы знаний (БЗ) правила (продукции, фреймы), цели, а также редактирует правила, цели, факты, комментарии и БЗ в целом. Эксперт может взаимодействовать с ЭС также непосредственно через интеллектуальную редактирующую программу, которая должна обладать развитыми возможностями для диалога и существенными способностями использования структуры БЗ (рис.7.2,б). Поскольку эксперт использует также прошлый опыт и данные из технической литературы, то принципиально может быть создана программа индуктивного вывода (рис.7.2,в) для создания БЗ аналогичным обра-

зом (обучающаяся программа). Наконец последний метод насыщения БЗ – извлечение знаний непосредственно из литературы (рис.7.2,г).

Технология приобретения знаний представляется как совокупность нескольких этапов. Процесс насыщения БЗ можно представить в виде схемы (рис.7.3).

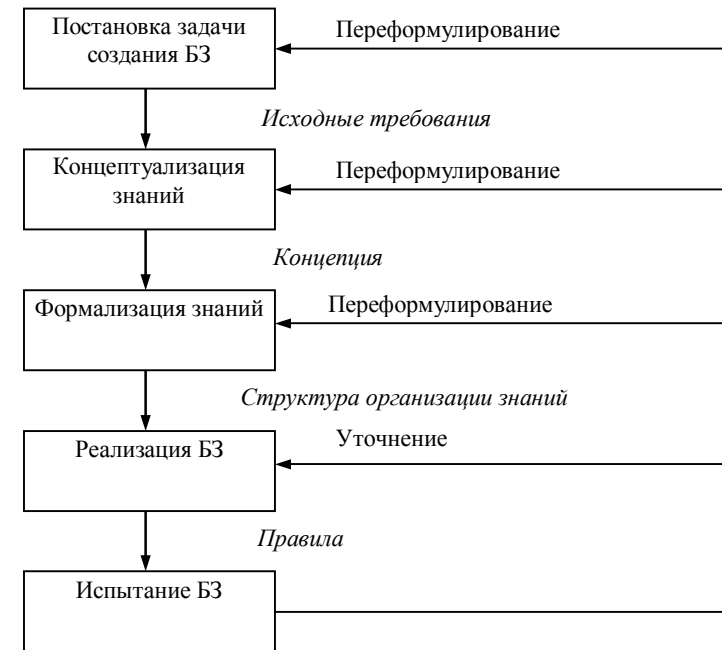


Рис.7.3. Схема процесса насыщения базы знаний

Он имеет две фазы: первая фаза содержит два этапа: постановка задачи (идентификация задачи насыщения БЗ) и концептуализация. На первом этапе необходимо сформулировать цель извлечения знаний, выбрать эксперта (группу экспертов), определить источники знаний, ресурсы и ограничения, очертить круг решаемых задач для достижения поставленной цели. Концептуализация предусматривает выбор основных понятий и связей, обеспечивающих ИЭС (ИУЭС) необходимой информацией для создания БЗ и базы данных (БД), а также для проведения качественной экспертизы состояния ОЭ (ОАУ). Выходом этого этапа являются исходные требования на разработку ИЭС (ИУЭС) и насыщение БЗ. Вторая фаза предусматривает формализа-

цию знаний для наполнения БЗ, практическую реализацию ЭС на основе созданной БЗ и ее испытание (тестирование), по результатам которого принимается решение о возврате к какому-либо этапу для совершенствования БЗ или о завершении проектирования.

Эти этапы относятся не только к задаче приобретения знаний, но и определяют подходы к проектированию всей системы в целом. На этапе концептуализации решается специфическая задача построения модели специалиста с целью выявления приемов и стратегий, используемых им в процессе решения задач в конкретной предметной области. На этапе формализации ключевым является выбор методологии, оптимально решающей поставленную задачу. Здесь решается вопрос о представлении знаний, механизмах логического вывода и их стратегиях, структуризации знаний и методах их извлечения из выбранных на этапе концептуализации форм представления знаний.

При отборе знаний используется ряд методов, приведенных на рис.7.4.

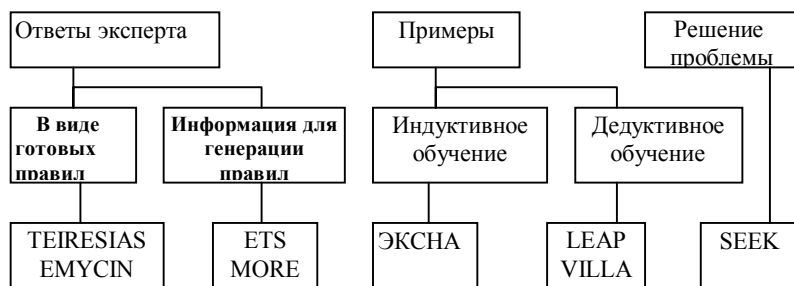


Рис.7.4. Методы отбора знаний и примеры ЭС, их реализующие

Метод, основанный на ответах специалиста (эксперта), сводится к интервью, инициатором которого является приобретающая знания ЭС. Основной проблемой этого метода является предоставление специалисту понятного и удобного формата ответа. Метод, основанный на примерах, может использовать индуктивное обучение, когда правила формируются на основе нескольких примеров с последующей универсализацией (специализацией) и дедуктивное обучение, когда правила формируются из одного примера. Метод отбора решением проблемы основан на отборе системой тех правил, которые оказались эффективными при нахождении решения.

Задачей этапа реализации является преобразование знаний,

формализованных на предыдущем этапе, в формат, с которым может оперировать выбранный МЛВ. Существуют несколько методов преобразования, приведенных на рис.7.5.

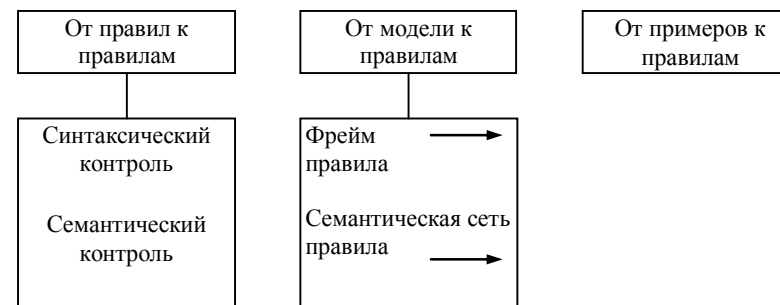


Рис.7.5. Методы преобразования знаний

В ИЭС (ИУЭС) используются следующие модели представления знаний: продукционные правила, фреймы, семантические сети. Продукционные правила – наиболее простая модель представления знаний. Фреймовая модель позволяет описывать проблемную область с помощью системы родовых понятий. Семантическая цепь наглядно отображает причинно-следственные связи между сущностями проблемной области, являющимися узлами сети.

Примером ЭС, построенной на продукционных правилах, является ЭС «ЭКСНА», разработанная в институте математике СО РАН, которая может служить «оболочкой», т.е. инструментальной ЭС для любой предметной области. Это продукционная система, расширяемая компонентой приобретения знаний из наборов данных, представленных в виде таблиц (отбор знаний из примеров). Знания в систему вводятся в виде продукции на естественном языке. В процессе приобретения знаний в систему вводятся правила и словарь «объектов» и атрибутов с указанием граничных значений этих атрибутов, что позволяет системе контролировать корректность правил исходных данных.

7.2. Методологические принципы автоматической классификации объекта экспертизы

Разделение рассматриваемой совокупности объектов или явлений на однородные (в определённом смысле) группы принято называть *классификацией*. Этот термин используют для обозначения как

самого процесса разделения, так и его результата. Это понятие тесно связано с такими терминами как *группировка, дискриминация, кластеризация, распознавание образов, таксономия*, которые являются в значительной степени синонимами.

К числу основных *методологических принципов*, лежащих в основе классификации и многомерного статистического анализа данных, относятся следующие:

1) необходимость учёта существенной многомерности данных (т.е. необходимо учитывать структуру и характер статистических взаимосвязей исследуемых признаков);

2) возможность лаконичного объяснения природы анализируемых многомерных структур (допущение, в соответствии с которым существует сравнительно небольшое число определяющих, иногда непосредственно ненаблюдаемых (латентных) факторов, с помощью которых могут быть достаточно точно описаны все наблюдаемые исходные данные, структура и характер связей между ними);

3) максимальное использование «обучения» в настройке математических моделей классификации и снижения размерности исходных данных;

4) возможность оптимизации задач классификации и снижения размерности, т.е. нахождения наилучшей процедуры статистической обработки данных с помощью оптимизации некоторого заданного критерия качества метода.

Первые два принципа определяются природой обрабатываемых данных, а следующие два – логикой построения технических средств

Методологические принципы классификации можно сформулировать следующим образом.

1. **Эффект существенной многомерности** заключается в том, что решения, применяемые в результате анализа и классификации множества статистически обследованных (по ряду свойств) «объектов», должны опираться одновременно на совокупность этих взаимосвязанных свойств с обязательным учётом структуры и характера их связей. Например, попытка создания диагностической модели ДВС для определения технического состояния на основе последовательного применения сначала одного признака, например, по полученным изменениям мощности от изменения скоростного режима, затем по другому – от изменения расхода топлива, затем по третьему – от изменения угла опережения подачи топлива, не позволяет получить достаточно достоверную модель. Это вызвано тем, что в силу принципа

действия ДВС существуют оптимальные режимы по расходу топлива, по углу опережения, по скорости. Достижение экстремума по какому-либо одному признаку ещё не свидетельствует о достижении глобального экстремума при режимах, отличных от тех, при которых были получены экспериментальные значения при изменении признаков (факторов) по-отдельности.

2. **Возможность лаконичного объяснения природы** анализируемых многомерных структур. Под многомерной структурой понимается множество статистически обследованных «объектов» $\{O_1, O_2, \dots, O_n\}$, результаты статистического обследования которых представляются в одной из двух форм:

1) таблицы (матрицы) «объект-свойство» вида

$$\bar{X} = (\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n) = \begin{pmatrix} x_1^{(1)} & x_2^{(1)} & \dots & x_n^{(1)} \\ x_1^{(2)} & x_2^{(2)} & \dots & x_n^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^{(p)} & x_2^{(p)} & \dots & x_n^{(p)} \end{pmatrix}, \quad (7.1)$$

2) таблицы (матрицы) попарных сравнений (взаимных расстояний, близостей) «объектов»

$$\bar{\rho} = \begin{pmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \dots & \rho_{1n} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \dots & \rho_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_{n1} & \rho_{n2} & \dots & \rho_{nn} \end{pmatrix}, \quad (7.2)$$

где элемент ρ_{ij} характеризует взаимную отдалённость (или близость)

объектов O_i и O_j , меру их связи и взаимодействия в каком-либо процессе и т.д.

Под возможностью лаконичного объяснения природы анализируемой многомерной структуры подразумевается априорное допущение, в соответствии с которым существует небольшое (в сравнении с p) число определяющих наиболее информативных (типообразующих) факторов, с помощью которых могут быть достаточно точно описаны как наблюдаемые характерные признаки анализируемых объектов (т.е. все элементы $X_i^{(k)}$ и ρ_{ij} соответствующих матриц \bar{X} и $\bar{\rho}$) и

характер связей между ними, так и искомая классификация самих «объектов». При этом эти определяющие (значимые) факторы могут находиться среди статистически обследованных характеристик, а могут быть непосредственно статистически ненаблюдаемыми, но восстанавливаемыми по исходным данным вида (7.1) или (7.2). Пример практической реализации этого принципа – периодическая система элементов Менделеева: в этом случае роль идеального информативного единственно определяющего фактора играет заряд атомного ядра элемента.

3. Максимальное использование «обучения» при настройке математических моделей классификации и снижения размерности. При решении задачи классификации «объектов» O_I на её «входе» имеем исходные данные (7.1) или (7.2), на «выходе» – номер класса, к которому отнесен «объект» O_I или перечень статистически представленных в форме (7.1) или (7.2) «объектов», входящих в тот же класс, что и «объект» O_I . На «выходе» задачи снижения размерности при том же «входе» будут значения искомым определяющих (типобразующих) факторов, характеризующих «объект» O_I (далее в этом разделе слово «объект» будем употреблять без кавычек).

Если известны «вход» и «выход» задачи, то исходную информацию (выборку) называют *обучающей* и целью задачи классификации является описание процедур, с помощью которых при поступлении только входных данных нового объекта его можно было бы с наибольшей (в определённом смысле) точностью отнести к одному из классов, а целью задачи снижения размерности – получить значения значимых факторов. Однако при использовании субъективных признаков для оценки состояния объекта, например, полученных органолептическими методами, имеется в качестве исходных данных лишь «входная» информация (7.1) или (7.2) и частично элементы «обучения».

Например, может быть известно, что определённая группа (из числа статистически обследованных) объектов относится к одному и тому же классу, но какие есть другие классы и как между ними распределены остальные статистически обследованные объекты, неизвестно. Но даже такая урезанная, частичная обучающая информация оказывается весьма полезной в решении задач «настройки» математических моделей, таких как, например, выбор метрики в исследуемом признаковом пространстве, оценка общего числа классов, выбор критерия качества классификации и т.д.

4. Возможность оптимизации задач классификации и снижения размерности. Среди множества возможных методов класси-

фикации и снижения размерности необходимо найти наилучший по некоторому критерию качества метод. Выбор критерия зависит от природы статистических данных и вида решаемых задач (их содержательных факторов – экономических, конструктивных, метрологических и т.д.).

Методика подготовки исходных данных для экспертизы основывается на общей логической процедуре их формирования. Она может быть представлена в виде последовательности ряда этапов, которые входят друг с другом в соотношении итерационного взаимодействия.

Этап 1. Исходный (предварительный) анализ ОЭ (ОАУ).

В результате этого анализа определяются:

а) основные цели экспертизы на неформализованном, содержательном уровне; б) совокупность элементов, представляющих предмет проведения экспертизы; в) перечень показателей $\vec{X} = \{X^{(1)}, X^{(2)}, \dots, X^{(n)}\}$, отобранных из представленного специалистами их априорного набора и характеризующих состояние (поведение) каждого из ОЭ (ОАУ), который предполагается использовать для экспертизы; г) степень формализации соответствующих записей при сборе данных; д) общее время, трудовые и материальные затраты, отведённые на проведение экспертизы; е) операции, требующие предварительной экспертизы и не связанные со статистической обработкой данных (изменение уровня жидкостей, комплектности и другие операции согласно технологической процедуре); ж) формализованная постановка задачи, по возможности включающая вероятностную модель ОЭ (ОАУ) и сущность статистических выводов, которые должны быть получены в результате обработки информационных потоков входных данных; з) алгоритм и программное обеспечение для обработки на ЭВМ входных информационных потоков (исходных данных).

Этап 2. Составление детального плана сбора исходной статистической информации.

В план входят следующие пункты:

1) определяется какой должна быть выборка – случайной, пропорциональной, расслоённой и т.п.; 2) производится расчёт максимально возможного объёма и продолжительности информационных потоков, учитывающих все возможные статистические связи между признаками; 3) для входных переменных (или для обоснованной их части) проводится планирование активного эксперимента.

Этап 3. Сбор исходных статистических данных и их введение в ЭВМ.

Исходные данные представляются потоком (массивом) временных последовательностей матриц вида:

$$\|X(t)\| = \begin{pmatrix} x_1^{(1)}(t), x_2^{(1)}(t), \dots, x_n^{(1)}(t) \\ x_1^{(2)}(t), x_2^{(2)}(t), \dots, x_n^{(2)}(t) \\ \dots \\ x_1^{(p)}(t), x_2^{(p)}(t), \dots, x_n^{(p)}(t) \end{pmatrix}, \quad t = t_1, t_2, \dots, t_N, \quad (7.3)$$

где $x_i^{(k)}(t)$ - значение k -го признака, характеризующего состояние i -го объекта в момент времени t .

Иногда t_i может быть случайной величиной для каждого объекта.

Ряд данных (особенно полученных при анкетировании и методом экспертных оценок) может быть представлен в виде потока (массива) временной последовательности матриц близости разряда $n \times n$ (если рассматриваются параметры попарной близости объектов) или $p \times p$ (если рассматриваются параметры попарной близости признаков) в виде:

$$\|\rho(t)\| = \begin{pmatrix} \rho_{11}(t), \rho_{12}(t), \dots, \rho_{1m}(t) \\ \rho_{21}(t), \rho_{22}(t), \dots, \rho_{2m}(t) \\ \dots \\ \rho_{m1}(t), \rho_{m2}(t), \dots, \rho_{mm}(t) \end{pmatrix}; \quad m=n \text{ или } p; \quad t = t_1, t_2, \dots, t_N, \quad (7.4)$$

где $\rho_{ij}(t)$ - параметр попарной близости (отдалённости) двух объектов (или признаков) соответственно с номерами i и j , отнесённый к моменту времени t .

В целях упрощения обозначений в дальнейшем полагаем, что потоки (7.3) и (7.4) отнесены лишь к одному какому-то фиксированному моменту времени t , обозначение которого будем опускать.

Этап 4. Первичная статическая обработка данных включает:

1) отображение переменных, описанных текстом, в нормальную (с предписанным числом градаций) или в ординальную (порядковую) шкалу; 2) статистическое описание исходных совокупностей с определением пределов варьирования переменных; 3) анализ резко выделяющихся переменных; 4) восстановление пропущенных наблюдений; 5) проверка статистической независимости наблюдений, составляющих массив исходных данных; 6) унификация типов пере-

менных, когда с помощью различных приёмов добиваются унифицированной записи всех переменных; 7) экспериментальный анализ закона распределения исходной генеральной совокупности.

Этап 5. Составление детального плана вычислительного анализа данных:

1) определяются основные группы, для которых будет проводиться дальнейший анализ; 2) пополняется и уточняется тезаурус содержательных понятий; 3) чётко описывается процедура анализа (блок-схема) с указанием привлекаемых методов; 4) формулируется оптимизационный критерий, на основании которого выбирается один из альтернативных методов основной статистической обработки исходных данных.

Этап 6. Вычислительная реализация основной части статистической обработки данных:

1) обеспечение вычислений с учётом размерности задачи, алгоритмической сложности вычислений; 2) выбор ЭВМ с учётом длины слова, быстродействия, объёма памяти и т.п.

Этап 7. Обобщение и анализ результатов экспертизы. Составление экспертного заключения.

Формулировку задачи поиска зависимостей между параметрами состояния ОЭ или ОАУ (факторами) и признаками классификации (откликами) можно представить следующим образом.

Технологический процесс классификации состояния ОЭ или ОАУ может быть выражен в виде описания характера или структуры взаимосвязей (зависимостей) между рабочими процессами и их показателями (переменными). Эти зависимости как правило стохастичны по своей природе, т.е. позволяют устанавливать лишь вероятностные соотношения между событиями A и B , а именно соотношения типа «из факта осуществления события A следует, что событие B должно произойти, но не обязательно, а лишь с некоторой (как правило близкой к единице) вероятностью P ». Эти зависимости выявляются на основании статистических наблюдений за рабочими процессами или переменными, их отражающими. Наблюдения осуществляются по выборке из интересующей экспертизу генеральной совокупности. Описание таких зависимостей имеет свой математический аппарат статистического исследования.

Функционирование реального ОЭ или ОАУ и его описание с помощью переменных в самом общем виде можно представить в виде схемы (рис. 7.6). На рисунке обозначено: $\vec{X} = \{x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(p)}\}$ - множество входных переменных, описывающих условие функционирования (часть из них, поддаётся управлению) - в математических мо-

делях их называют также независимыми переменными, факторами-аргументами, экзогенными, объясняющими, предикторными переменными (или просто предикторами, т.е. предсказателями); $\vec{Y} = \{y^{(1)}, y^{(2)}, \dots, y^{(m)}\}$ - множество выходных переменных, характеризующих поведение или результат, т.е. эффективность функционирования (в математических моделях их называют также зависимыми переменными, откликами, эндогенными, результирующими или объясняемыми переменными); $\vec{E} = \{e^{(1)}, e^{(2)}, \dots, e^{(m)}\}$ - латентные (т.е. скрытые, не поддающиеся непосредственному измерению) случайные компоненты, отражающие влияние (соответственно на $y^{(1)}, y^{(2)}, \dots, y^{(m)}$) неучтенных «на входе» факторов, а также случайные ошибки в измерении анализируемых показателей (в математических моделях их называют «остатками»).

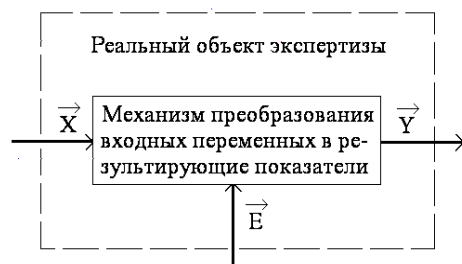


Рис 7.6. Функционирование объекта экспертизы

Общая задача статистического исследования зависимостей формулируется следующим образом: по результатам n измерений

$\{x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \dots, x_i^{(p)}; y_i^{(1)}, y_i^{(2)}, \dots, y_i^{(m)}\}; i = \overline{1, n}$, исследуемых переменных ОЭ или ОАУ (анализируемой совокупности) построить такую векторно-значную функцию:

$$\vec{f}(x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(p)}) = \begin{pmatrix} f^{(1)}(x^{(1)}, \dots, x^{(p)}) \\ f^{(2)}(x^{(1)}, \dots, x^{(p)}) \\ \dots \\ f^{(m)}(x^{(1)}, \dots, x^{(p)}) \end{pmatrix},$$

которая позволила бы наилучшим, в определенном смысле, образом восстанавливать значения результирующих (прогнозируемых) переменных $\vec{Y} = \{y^{(1)}, y^{(2)}, \dots, y^{(m)}\}'$ по заданным значениям объясняющих (предикторных) переменных $\vec{X} = \{x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(p)}\}'$. Здесь штрих при векторе или матрице означает операцию транспонирования, т.е. \vec{Y} и \vec{X} здесь являются m - и p -мерными вектор-столбцами.

Задача поиска зависимости между факторами и откликом представляется следующим образом. Вектор регистрируемых на ОЭ (ОАУ) показателей \vec{X} интерпретируется как вектор параметров функционирования (состояния) ОЭ (ОАУ), вектор \vec{Y} - как вектор результирующих показателей, характеризующих поведение или эффективность функционирования (качество или смену состояний) ОЭ (ОАУ). Необходимо определить такую векторную функцию $\vec{f}(\vec{X})$ из класса допустимых решений \vec{F} , которая давала бы наилучшую, в определенном смысле, аппроксимацию поведения вектора \vec{Y} на множестве точек-наблюдений $\{x_i\}, i = \overline{1, n}$:

$$\vec{Y} = \vec{f}(\vec{X}),$$

$$\text{где } \vec{Y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_p \end{pmatrix}; \quad \vec{f} = \begin{pmatrix} f_1(\vec{X}) \\ f_2(\vec{X}) \\ \dots \\ f_p(\vec{X}) \end{pmatrix}; \quad \vec{X} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_p \end{pmatrix}. \quad (7.5)$$

Погрешность в описании результирующего признака x_k с помощью функции $\vec{f}_k(\vec{X})$ в точке \vec{X}_i характеризуется невязкой

$\delta_{ki} = \delta(f_k(\vec{x}_i))$, а мерой адекватности модели служит функционал

$$\Delta(\vec{f}) = \Delta(\{\delta_{ki}\}, k = \overline{1, p}; i = \overline{1, n}),$$

т.е. $\vec{Y} \approx \vec{f}_k(\vec{X})$ с точностью до $\Delta(\vec{f})$.

Таким образом, задача поиска зависимости показателей \bar{Y} (зависимых переменных, откликов) от факторов \bar{X} сводится к решению экстремальной задачи вида :

$$\Delta(\bar{f}) = \underset{\bar{f} \in \bar{F}}{\text{extr}} \Delta(\bar{f}(\bar{x})) \quad i = \overline{1, n}. \quad (7.6)$$

Конкретный вид невязок δ_{ki} функционала адекватности $\Delta(\bar{f})$ и класса допустимых решений \bar{F} определяется в зависимости от природы анализируемых исходных данных и от некоторых априорных сведений о природе и структуре искомых зависимостей. Если \bar{F} задается некоторым параметрическим семейством функции $\{f(\bar{X}, \bar{\Theta})\}$, то задача сводится к перебору (статистическому оцениванию) значений параметров $\hat{\bar{\Theta}}$, на которых достигается экстремум (7.6), а соответственно методы экспертизы называются параметрическими.

В практических задачах наибольшее применение находят аддитивные аппроксимационно-регрессивные модели вида

$$\bar{Y} = \bar{f}(\bar{X}) + \bar{\varepsilon}, \quad (7.7)$$

где $\bar{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_p \end{pmatrix}$ вектор-столбец остатков.

Вектор $\bar{\varepsilon}$ отражает или влияние на \bar{Y} случайных неучтенных факторов, или (в качестве ошибки аппроксимации) меру достижимой аппроксимации показателей \bar{Y} функциями из класса \bar{F} , или и то и другое одновременно. Параметрический вариант модели (7.7) может быть записан в виде

$$\bar{Y} = \bar{f}(\bar{X}, \bar{\Theta}) + \bar{\varepsilon}.$$

В зависимости от характера дополнительных допущений по поводу природы остатков ε и класса функций \bar{F} получим тот или иной вид невязок δ_{ki} и функционала Δ , что определяет вид аппроксимационно-регрессионных моделей и способ оценивания неизвестных параметров модели.

Рассмотрим *общую постановку задачи классификации «объектов» или «признаков»*.

Полагаем, что каждый из «объектов» задан соответствующим столбцом матрицы (7.3), или что геометрическая структура их попарных расстояний (связей) задана матрицей (7.4). Каждый из признаков задается соответствующей строкой матрицы (7.4). Постановка задачи и основная методологическая схема классификации «объектов» и «признаков» идентичны, поэтому в дальнейшем их не будем разделять и использовать далее слово «объект» без кавычек.

В *общей постановке* задача классификации объектов заключается в том, что всю анализируемую совокупность объектов $\bar{O} = \{O_i\}$, $i = \overline{1, n}$, статистически представленную в виде (7.3)

или (7.4), необходимо разбить на сравнительно небольшое число однородных, в определенном смысле, групп или классов. Для формализации этой задачи удобно интерпретировать анализируемые объекты в качестве точек в соответствующем факторном (признаковом) пространстве: если исходные данные представлены в виде (7.3), то эти точки являются непосредственным геометрическим изображением многомерных наблюдений $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n$ в p -мерном пространстве

\bar{X} с координатами $O_i^{(1)}, O_i^{(2)}, \dots, O_i^{(p)}$; если же исходные данные представлены в виде (7.4), то неизвестны непосредственно координаты этих точек, но зато задана структура попарных расстояний между объектами (признаками). Естественно полагать, что геометрическая близость двух или нескольких точек в этом пространстве означает близость «физических» состояний соответствующих объектов, их однородность. Тогда задача классификации состоит в разбиении всей совокупности точек - наблюдений на сравнительно небольшое число - заранее известное или нет - сгустков (классов, скоплений, таксонов, образов), которые находятся на некотором расстоянии друг от друга (в смысле метрики, введенной в соответствующем пространстве \bar{X}), но сами не разбиваются на столь же удаленные классы.

Выбор алгоритма классификации \bar{S} определяется соответствующим критерием, или функционалом качества классификации $\bar{Q}(S)$. Вид этого функционала, а также определение класса \bar{A} допустимых правил классификации, зависит от характера априорных сведений об искомых классах и от наличия (отсутствия) предварительной выборочной информации (обучающих выборок) об этих классах.

Таким образом, задача классификации совокупности объектов

\bar{O} есть задача поиска такого разбиения (правила классификации)

\bar{S}^* заданной совокупности \bar{O} на непересекающиеся классы

$$S_1^*, S_2^*, \dots, S_k^*; \bigcup_{j=1}^k S_j = \bar{O}; S_i \cap S_j = 0 \quad (\text{знак } 0 \text{ обозначает пустое}$$

множество), при котором функционал качества $Q(\bar{S})$ достигает своего экстремального значения на \bar{A} , т.е. $Q(\bar{S}^*) = \min_{\bar{S} \in \bar{A}} Q(\bar{S})$ или

$$Q(\bar{S}^*) = \max_{\bar{S} \in \bar{A}} Q(\bar{S}).$$

При этом число классов k может быть как за-

ранее заданным, так и неизвестным.
 При решении задач экспертизы состояния ДВС применяются два основных класса моделей: математические (аналитические) и семантические, требующие для реализации разные аппаратные и программные средства. Модели первого типа реализуются с помощью числовой последовательности и параллельной обработки на основе процедурно-управляемого потока вычислений. Модели второго типа реализуются с помощью символьной интерактивной обработки на базе вычислительных процедур, управляемых потоками данных с широким применением эвристических методов. Для сопровождения, настройки и верификации моделей служат настраиваемые инструментальные «оболочки» экспертных систем. Для моделей первого типа применяются преимущественно методы классификации п.4 и п.5, а для моделей второго типа - п.6, представленные на рис.7.7.

7.3. Принципы программного обеспечения ИЭС (ИУЭС)

В экспертных системах используется символьный способ представления, символьный вывод и эвристический поиск решения. Поэтому при создании программных средств необходим качественно иной подход, который позволит решить как минимум следующие задачи. Во-первых, ИЭС (ИУЭС) должна выдавать практические решения об отнесении ОЭ (ОАУ) к тому или иному классу состояний и фактически не уступать в качестве принимаемых решений эксперту-специалисту. Во-вторых, ее решения должны обладать «прозрачностью», т.е. могут быть объяснены эксперту на качественном уровне. В-третьих, экспертная система должна пополнять свои знания в ходе диалога с экспертом (инженером знаний). Программное обеспечение (ПО) ИЭС (ИУЭС) можно разделить на следующие части: системное, базовое и прикладное.



Рис.7.7. Структура методики классификации ОЭ (ОАУ)

Системное ПО управляет ресурсами ПЭВМ; базовое ПО дополняет системное, взаимодействует с ним и измерительно-вычислительными компонентами ИИС. Прикладное ПО обеспечивает экспертную оценку ОЭ (ОАУ), относя его к тому или иному классу состояний. При этом максимально используется *системное* ПО ПЭВМ.

Базовое ПО определяется структурой построения ИЭС (ИУЭС), его измерительной подсистемой (ИИС) и должно обеспечивать выполнение следующих функций: управление измерительной частью; первичную обработку данных; проведение диалога с оператором; тестирование технических средств; отображение результатов измерения.

Прикладные программы формируют базу данных и базу знаний. В первой из них содержатся исходные, текущие и итоговые данные об измеряемых процессах, модели сигналов-эталонов, константы и другие данные. Во второй - содержится набор необходимых сведений о ОЭ (ОАУ) и методах получения экспертных заключений, технологическая цепочка процедур и алгоритмов проведения экспертизы. Логическая схема технологической цепочки в свою очередь содержит ряд разделов (блоков): «общие указания», «подготовка к испытаниям», «предварительная экспертиза», «общая экспертиза», «углубленная экспертиза», «заключительные работы». На каждом из этапов делается заключение о дальнейшем направлении экспертизы, и формулируются выводы о проведении мероприятий по восстановлению параметров ОЭ (ОАУ) до нормы.

В качестве примера рассмотрим блок анализа знаний инструментальной ЭС «ЭКСНА», который предоставляет эксперту программные средства, обеспечивающие два основных режима работы:

режим подготовки (формирование БЗ) - представление знаний (после их систематизации и определения структуры) в виде набора входных файлов;

режим экспертизы (получения экспертной рекомендации) - логический вывод при наличии уже сформированной БЗ. После опроса эксперта-пользователя (ввода начальных условий), система обрабатывает и выдает экспертную рекомендацию.

Кроме того, имеются дополнительные возможности дальнейшего развития БЗ путём её наполнения, коррекции, восстановления и т.п. Предусмотрены также интеллектуальные сервисные возможности по поиску противоречий в знаниях, проверке знаний на данных, оценке достоверности вводимых правил.

Для формирования БЗ (режим подготовки) ЭКСНА предоставляет программные средства, позволяющие создать следующие вход-

ные файлы: rules.dat - правила производного типа; slov.dat - «словарь» БЗ; work.dat - таблицы данных; work.pet - описание таблицы; work.inf - наименование объектов и признаков; clu.txt - ключевые слова. Вся входная информация готовится заранее с помощью любого текстового редактора.

Файл rules.dat содержит правила-продукции вида:

если $A_1 \& \dots \& A_N$, то B .

Элементы $A_1, A_2, \dots, A_N; B$ - называются фактами или показателями, $\&$ - конъюнкция (логические операции «И», «совпадение»).

Файл work.dat готовится в виде таблицы. В этой таблице каждому из показателей, участвующему в описании правила, соответствует столбец (или строка) числовых значений. Есть два способа ввода: «по объектам», т.е. сначала вводятся все показатели 1-го объекта, затем все показатели 2-го и т.д.; «по признакам» - вначале вводится 1-й показатель для всех объектов, затем 2-й и т.д. Способ ввода указывается в файле work.pet. Файл work.pet включает информацию о числе объектов, которые занесены в БЗ, а также о порядке выполнения каждой операции технологической процедуры, виде записи данных по признакам или по объектам и т.д. Файл work.inf. содержит словесное описание объектов и показателей. Он формируется следующим образом: вначале задаются имена всех объектов, затем имена всех показателей. Файл clu.txt предназначен для записи вопросов к пользователю и соответствующих им ключевых слов - по ним программа будет искать варианты ответов среди имеющихся в БЗ показателей. Ключевыми словами должны быть «охвачены» все показатели. Файл описывает исходную ситуацию, позволяющую выдать системе необходимую экспертную рекомендацию.

СибФТИ совместно с ИМ СО РАН были доработаны программные средства и введены дополнительные входные файлы, которые увеличивают возможности системы и улучшают пользовательский интерфейс: help.hlp, help.txt - файлы помощи; data.dat - файл исходных данных; clu.hlp - файл пояснений. Кроме того, в файлы rules.dat, slov.dat внесены изменения для формирования правил с использованием расчетов по формулам. Файлы помощи help.txt и help.hlp предназначены для подготовки дополнительных пояснений к экспертным рекомендациям (заключениям) ЭС. Здесь также могут содержаться пояснения к выбираемым показателям. Эта возможность полезна для объяснения пользователю ЭС, что подразумевается под тем или иным показателем, а также для вынесения каких-то дополнительных замечаний. Файл пояснений clu.hlp - это текстовый файл, построенный на основе файла ключевых слов clu.txt и содержащий пояснения для во-

просов, задаваемых ЭС при описании исходной ситуации. Это позволяет пояснить пользователю ЭС некоторые дополнительные особенности, которые не были отражены в самом вопросе из-за ограниченности его длины. В файл data.dat заносятся показатели, запрашиваемые системой при описании исходной ситуации и практически не изменяющиеся во время работы. Это дает возможность упростить процедуру ввода (в каждом сеансе работы вводить только изменяющиеся показатели), но при экспертизе будут использоваться наряду с этими и данные из файла data.dat.

При проверке знаний на данных необходимо иметь файл rules.dat с производционными правилами типа *ЕСЛИ ... ТО ...*, таблицу данных work.dat и файл со словесным описанием объектов и показателей work.inf, где каждому показателю, участвующему в описании правила, соответствуют числовые значения. Кроме этого в ЭС есть дополнительные возможности для просмотра БЗ и ее словаря, проведения чистки, внесения изменений и дополнений, а также для создания резервной копии.

В режиме экспертизы - логический вывод - пользователь должен ввести данные о своей ситуации. Нужно на каждый вопрос выбрать ответ из перечней, предлагаемых ЭС. После ввода у пользователя есть возможность до выхода на экспертизу просмотреть исходные данные и, при необходимости, проделать с ними различные операции: удалить, добавить, заменить и т.д. Суть механизма логического вывода сводится к следующему: если из факта *A* следует факт *B* и факт *C*, аналогичный в какой-то степени факту *A*, то из значения *C* выводится значение *B* с некоторой долей уверенности. Алгоритм логического вывода использует введенные исходные данные и все правила, хранящиеся в БЗ.

Структурная схема и алгоритм работы ИЭС на базе «оболочки» ЭКСНА представлены на рис.7.8 и 7.9, а обобщенная структура взаимодействия ИЭС с ОЭ – на рис.7.10. На рис.7.10 обозначены векторы воздействий: $\vec{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ - среды на ОЭ; $\vec{Y} = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ - ОЭ на среду; $\vec{U} = \{u_1, u_2, \dots, u_z\}$ - управляющих на ОЭ; $\vec{\xi} = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_u\}$ - неконтролируемых среды на ОЭ; векторы информативных признаков: $\vec{S}_x = \{S_{x_1}, S_{x_2}, \dots, S_{x_t}\}$ и $\vec{S}_y = \{S_{y_1}, S_{y_2}, \dots, S_{y_t}\}$ - об объекте и среде.

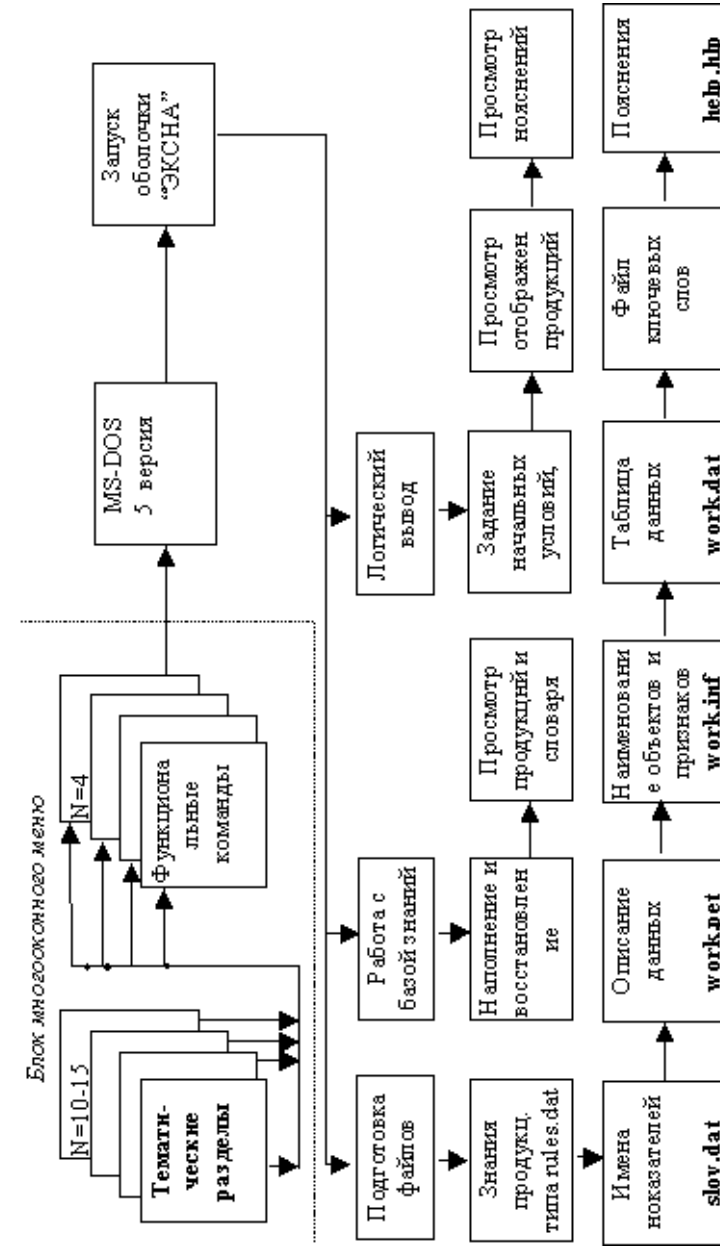


Рис.7.8. Структурная схема экспертной системы

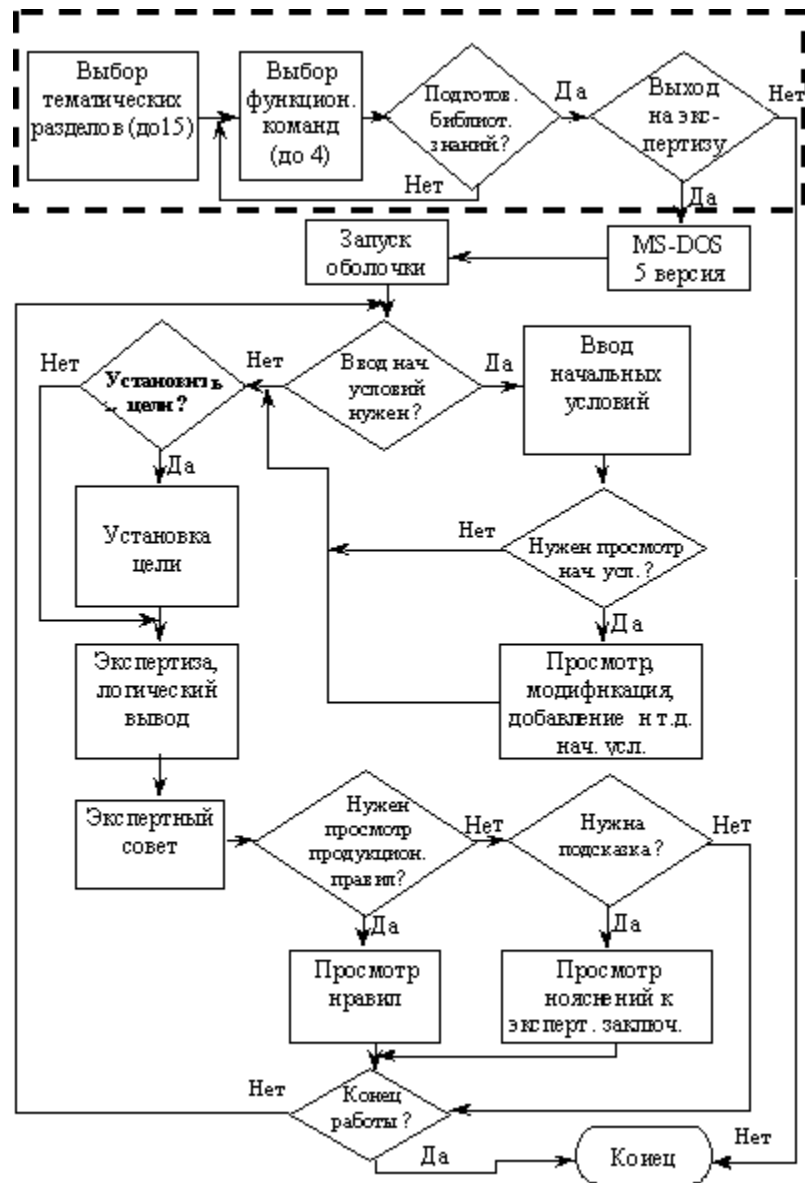


Рис.7.9. Алгоритм работы экспертной системы

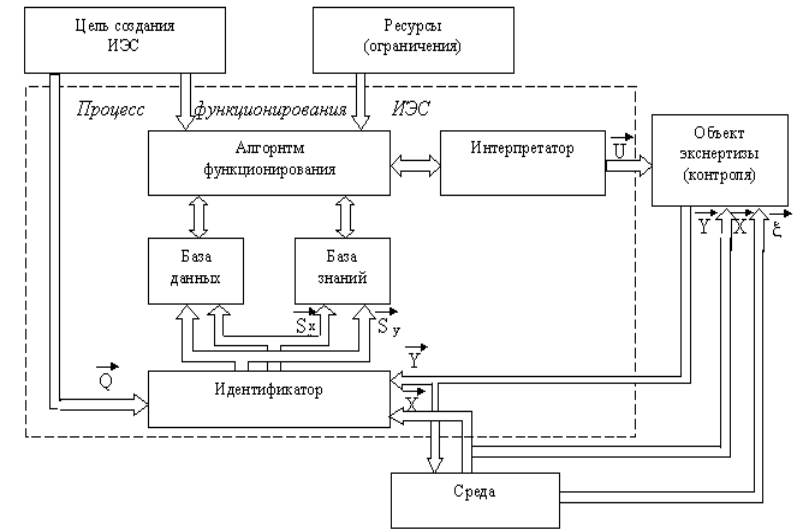


Рис.7.10. Структура взаимодействия ИЭС с объектом экспертизы

Алгоритм управления можно представить как циклический процесс последовательного обращения к двум операторам - идентификации и принятия решений. Оператор идентификации осуществляет сбор и обработку информации о поведении ОЭ (ОАУ) и сравнение его с моделью \vec{Y}_M . В процессе идентификации поступает информация \vec{Y} о реакции объекта на управление \vec{U} и эксперимент \vec{U}^r (тестовое воздействие, выделенное из \vec{U}). Процесс идентификации заключается в наиболее точной оценке оператора ОЭ по наблюдениям входов и выходов объекта. Эффективность этого этапа определяется оператором $\mathcal{E}_I(Y, Y_M) \rightarrow Y_M^{min} \in \Omega$ ($\vec{U}_M = var \in \tilde{\Omega}$), где выражение в скобках означает, что вариация управления \vec{U} ограничена некоторой областью $\tilde{\Omega}$, т.е. некоторым множеством допустимых тестовых экспериментов. Целью оператора принятия решения является синтез управляющего воздействия \vec{U} , которое переводит объект управления в состояние, наименьшим образом отличающееся от требуемого.

Тема 8. Методика выбора и обоснования параметров программируемых микропроцессорных систем автоматического управления

8.1. Стадии создания технического обеспечения программируемых систем управления на основе микропроцессорной техники.

Состояние ОАУ может оцениваться по входным величинам $\bar{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, воспринимаемым системой от объекта и отражающим его свойства, или по значениям функций от входных величин $F(\bar{X})$. Величины или функции, которые непосредственно сопоставляются с уставками (нормами), являются непосредственно контролируемыми величинами (параметрами).

Чтобы получить в результате измерительного преобразования (контроля) информацию о соотношении между текущим состоянием ОАУ и нормальным, любой измерительно-преобразовательный элемент (ИПЭ) ПСУ, в том числе автоматизированной системы контроля, должен выполнять следующие основные функции: 1) восприятие входных величин \bar{X} и преобразование их в сигналы, необходимые для последующих операций; 2) формирование и реализация норм (уставок) в аналоговом и цифровом видах; 3) сравнение входных величин или функций от них с описанием норм (уставок); 4) формирование количественного результата; 5) выдача количественных результатов о состоянии ОАУ; 6) автоматическое управление работой ПСУ; 7) аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразования; 8) выдача аналоговой или цифровой информации; 9) вычислительные процедуры над аналоговыми и цифровыми сигналами или над результатами контроля; 10) формирование тестирующих и компенсирующих воздействий на ОАУ, необходимых для получения измерительной (контрольной) информации; 11) выполнение операций самоконтроля системы.

Классификация ПСУ по принципу построения приведена в табл. 8.1. Порядок выполнения операций (последовательно или параллельно) во многом определяет количество элементов системы, быстродействие, надежность и т.п. Использование для совместной работы функциональных блоков стандартных агрегатных комплексов и цифровых интерфейсов значительно упрощает процесс разработки системы и её метрологическое обеспечение.

Система, содержащая вычислительную (микропроцессорную) технику, является более универсальной, так как может выполнять

функции систем различного назначения при их перепрограммировании. Наличие контура обратной информационной связи позволяет организовать компенсационные методы измерения, позволяющие получить более высокие точностные характеристики. Изменение скоростей получения и выдачи информации в ПСУ возможно при использовании запоминающих устройств (быстрого запоминания значений контролируемых величин и медленной выдачи информации и наоборот). Введение адаптации систем к исследуемым величинам, структурной и информационной избыточности способствует повышению надежности, помехоустойчивости, точности и гибкости работы.

Таблица 8.1

Классификация принципов построения ПСУ

Признак	Класс	
Порядок выполнения операций получения информации	Последовательный	Параллельный
Агрегатирование состава системы	Агрегатированный	Неагрегатированный
Использование стандартного интерфейса	Не используется	Используется
Наличие программно-управляемых вычислительных устройств (микроЭВМ, МПС и др.)	Отсутствуют	Имеются
Наличие контуров информационной обратной связи	Разомкнутые системы	Компенсационные (одно- и многоконтурные системы)
Изменение скоростей получения и выдачи информации	Без изменения (в реальном времени)	С изменением скоростей
Сигналы, используемые в системе	Аналоговые	Кодоимпульсные
Структурная и информационная избыточность	Безизбыточные системы	Избыточные системы
Адаптация к исследуемым величинам	Неадаптивные системы	Адаптивные системы
Наличие специального канала связи	Отсутствует	Имеется

На рис.8.1 представлена схема, описывающая процесс создания технического обеспечения ПСУ. На первой стадии (постановка задачи) осуществляется анализ требований, предъявляемых к системе, выбираются критерии оценки цели, планируется решение с учетом имеющихся средств, ведётся расчленение задачи на подзадачи. На второй стадии выбирается и обосновывается метод решения задачи извлечения информации. Отличительной особенностью третьего этапа является формализация алгоритмов на уровне арифметических и логических операций, а не на уровне операций, реализуемых аппаратно. В блок-схеме алгоритма намечается разделение алгоритма решаемой задачи на программную и аппаратную части.

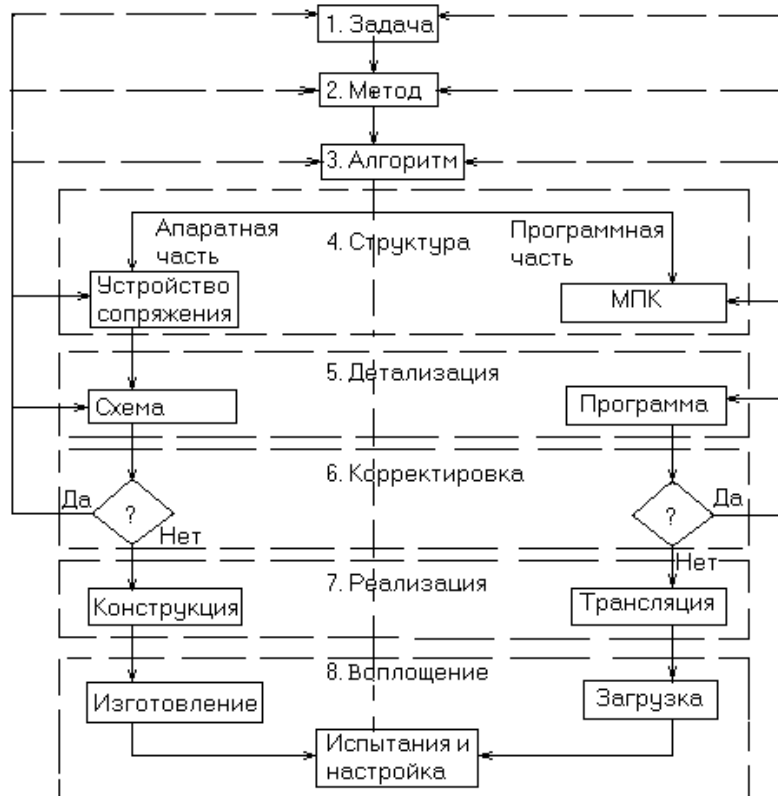


Рис. 8.1. Последовательность разработки технического обеспечения ПСУ

Четвертый этап заключается в выборе структуры, здесь главное – раздвоение процесса проектирования на аппаратную и программную части (разработка устройства сопряжения с объектом (УСО) и создание программы вычислений в соответствии с алгоритмом решения задачи. Ограниченные возможности микропроцессоров (МП) (в частности, по быстродействию) приводят к необходимости выполнения ряда операций с помощью внешних устройств обработки сигналов. Кроме того, некоторые операции проще выполнить с помощью простейших аппаратных средств, в то время как их программное исполнение затруднительно. Разумное сочетание аппаратных и программных операций позволяет снизить требования к вычислительным возможностям МП и упростить реализацию системы в целом.

На пятом этапе (детализации) разработка аппаратной части завершается составлением функциональной схемы УСО на уровне, позволяющим выбрать элементную базу, оценить объём аппаратных затрат и перейти к составлению принципиальной схемы. Составленная на этом этапе рабочая программа позволяет оценить требуемый объём вычислительных затрат (объём ОЗУ, ПЗУ, время вычислений и т.п.) и перейти к трансляции программы на язык машинных кодов МП.

На шестом этапе осуществляется при необходимости корректировка функциональной схемы или рабочей программы, структуры системы, алгоритма, метода или задачи. Корректировка схемы или рабочей программы применяется, если требуется незначительное сокращение аппаратных или вычислительных затрат. Корректировка структуры проводится, когда обнаружено существенное несоответствие её основных характеристик предъявляемым требованиям, которое не может быть устранено на этапе детализации. Варианты решений здесь такие: выполнение части вычислительных операций аппаратным путём в связи с малым быстродействием МП; замена некоторой аппаратной реализации на программную в связи с избытком быстродействия МП; изменение способа обмена данными между внешними устройствами и МП из-за больших затрат времени или объёма памяти; выбор более подходящей микроЭВМ (комплекта МП) и элементной базы для аппаратной части. Корректировка алгоритма бывает необходима, если выясняется, что выбранный алгоритм нельзя реализовать на основе имеющейся элементной базы, или его реализация не удовлетворяет заданным техническим требованиям. Проводится анализ возможности упрощения и видоизменения ал-

горитма. Если же анализ показывает, что никакие упрощения и видоизменения неприемлемы, то необходима корректировка метода решения задачи и постановки самой задачи.

8.2. Обоснование структуры ПСУ, выбор микроЭВМ (микропроцессорной системы - МПС).

Могут быть выделены четыре типа наиболее характерных схем функциональной структуры ПСУ технологическими процессами (рис.8.2, а,б):

1) МПС (микроЭВМ) ПСУ выполняет только информационные функции, управляющие функции реализуются локальными системами автоматического контроля, регулирования и управления (САК, САУ, САУ);

2) ПСУ выполняет те же функции, что ПСУ 1-го типа, но имеет ещё блок 5 –советчик (рис.8.2,а);

3) МПС (микроЭВМ) ПСУ выполняет информационные функции, настраивает локальные системы, советует, рассчитывает и выдаёт управляющие воздействия для участков производства;

4) МПС (микроЭВМ) ПСУ выполняет информационные и полностью управляющие функции в режиме прямого цифрового управления ТП (рис. 8.2,б).

Варианты структур ПСУ ТП, построенных по территориальному принципу приведены на рис. 8.3. При централизованной структуре ПСУ все подсистемы расположены в одном месте предприятия и на одном АРМ диспетчера, УВК которого связан каналами передачи с отдельными ТП участков. В функционально-распределённой ПСУ все функциональные подсистемы распределены между несколькими управляющими вычислительными комплексами (УВК), размещёнными в одном месте предприятия. Территориально-распределённая ПСУ построена по следующему принципу: система разбивается на ряд взаимосвязанных территориально-распределённых подсистем (производственных станций управления). Территориально- и функционально-распределённые ПСУ – это совокупность функциональных устройств, управляемых своими микроконтроллерами, центрального процессора, управляющего всей системой в целом и магистрали (линии связи), связывающей между собой разнесённые по производственным помещениям станции системы управления. Комбинированные ПСУ содержат элементы территориально- и функционально- распределённых систем.

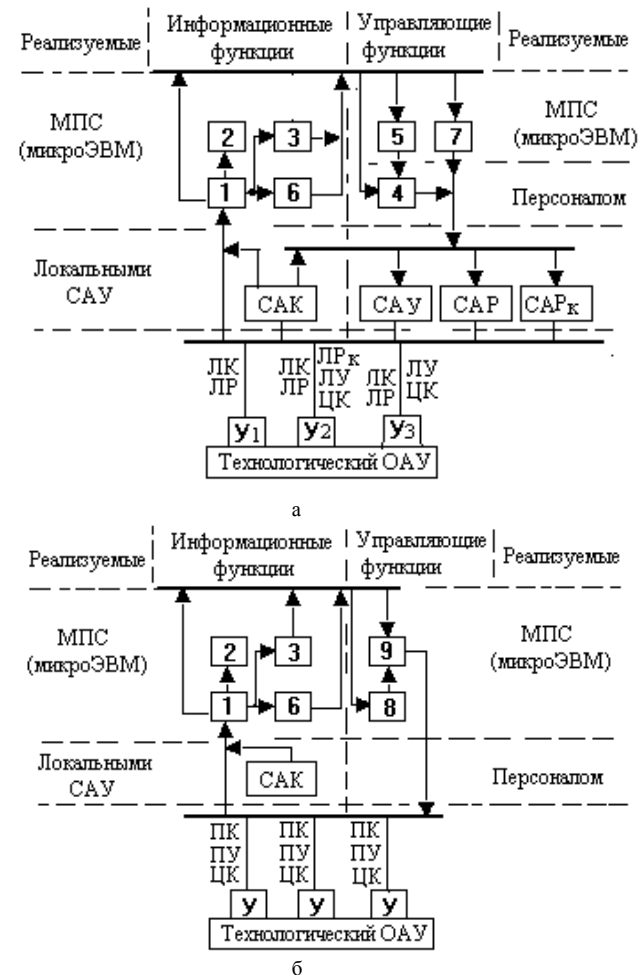


Рис. 8.2. Структуры ПСУ ТП с частичным выполнением управляющих функций (а); и с непосредственным управлением технологическими процессами (б): У – участок производства; ЛК, ЛР, ЛРк, ЛУ – локальные системы контроля, регулирования, регулирования с коррекцией параметров и управления; ЦК – система централизованного контроля; САРк – САУ с коррекцией параметров; 1 – блок ЦК технологических параметров и состояния оборудования; 2 – терминал диспетчера; 3 – блок обработки измерительной информации; 4 – блок коррекции задания по n-му параметру; 5 – блок советов (подсказок) диспетчеру; 6 – блок экспертизы и прогнозирования состояния ОАУ; 7 – блок расчёта и выработки решений (управляющих воздействий); 8 – формирователь управляющих воздействий; 9 – блок непосредственного управления

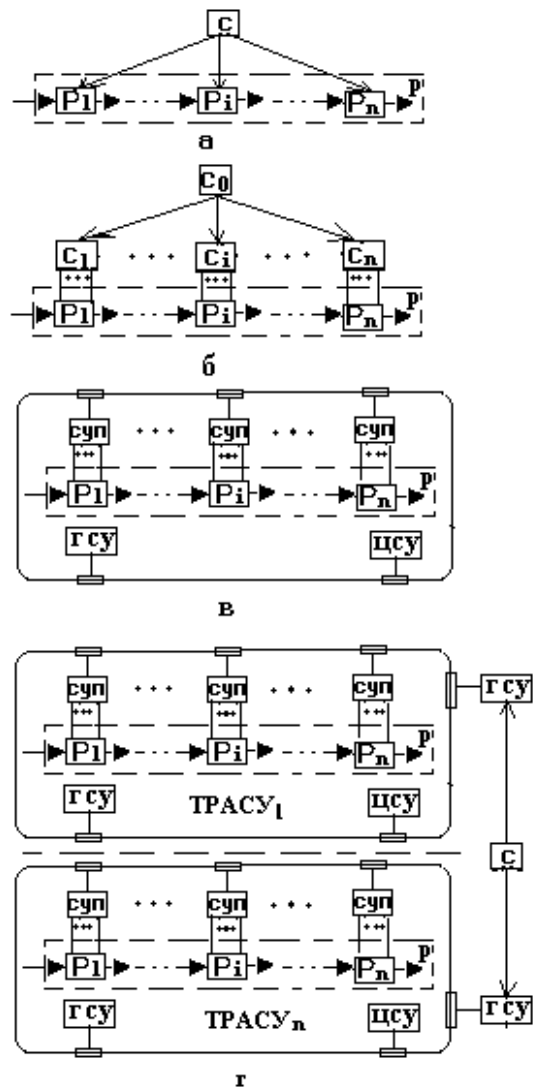


Рис. 8.3. Структуры ПСУ ТП, построенных по территориальному принципу (а – централизованная; б – территориально-распределённая; в – территориально- и функционально-распределённая; г – комбинированная): С, С₀, С₁, ..., С_н – централизованная система и её подсистемы; Р₁, ..., Р_н – участки ТП; СУП – станции управления процессом; ГСУ, ЦСУ – групповые и центральные станции управления

Методика обоснования структуры ПСУ (рис.8.4) и выбора микроЭВМ (или МПС) предусматривает следующие этапы:

1. Подготовка исходных данных для выбора ЭВМ (табл.8.2).
2. Подготовка исходных данных для выбора устройства сопряжения с объектом (УСО).
3. Определение необходимого быстродействия и объёма памяти микроЭВМ или числа микроЭВМ (табл.8.3).
4. Выбор УСО.
5. Проверка требований надежности.
6. Проверка эффективности микроЭВМ (см. табл.8.3).

Качество работы систем контроля и управления может быть определено следующими обобщёнными показателями: средним временем решения задачи; достоверностью результата; вероятностью решения в установленное время без отказов.

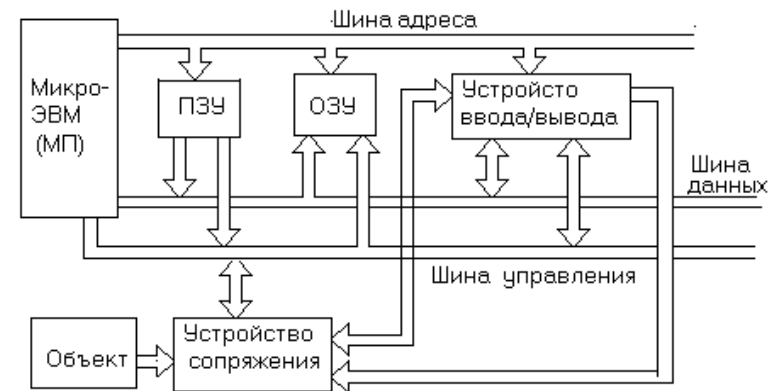


Рис. 8.4. Структурная схема ПСУ на базе микроЭВМ (МП - микропроцессор)

Комплекс требований на систему с микроЭВМ включает:

- группу функциональных требований (порядок и способы взаимодействия микроЭВМ с объектом и др.);
- группу технических требований: разрядность и форма представления информации – фиксированная или (и) плавающая запятая; разрядность и форматы команд; состав и число команд; время выполнения отдельных команд; информационный объём ЗУ (ОЗУ, ПЗУ, ППЗУ в отдельности); возможность наращивания памяти ЗУ; номенклатура датчиков и параметры выходных сигналов; требования к устройствам вывода и индикации информации; архитектура (струк-

тура аппаратурных средств, формат и система команд); число уровней прерывания; система прерываний; особенности системного программного обеспечения; требования к встроенному контролю; уровень реконфигурации аппаратурных средств; организация интерфейсов и физические длины линий связи между устройствами системы; скорость передачи информации и протоколы обмена информацией по внешним интерфейсам; схематические особенности интерфейсов (типы линий связи, логические уровни прерывания сигналов, входные и выходные сопротивления, гальваническая развязка и т.д.); параметры источников питания (номиналы напряжений, допуски на изменения, допуски на уровень помех);

• группу конструктивных и технологических требований: к габаритным, установочным и присоединительным размерам; к ограничениям по массе, способам монтажа системы на установках и по виду исполнения (блочное, моноблочное); доступ ко всем элементам системы в рабочем и нерабочем состояниях; к ограничениям по транспортировке, по средствам защиты от климатических, механических и других факторов воздействия; по технике безопасности, по применению прогрессивных технологических процессов, по надёжности (наработка на отказ, коэффициент готовности и др.).

При решении задач обработки данных используются следующие справочные данные, учитывающие частоту появления k -й операции, в процентах.

Сложение, вычитание с фиксированной запятой	6,1
Умножение с фиксированной запятой	0,6
Деление с фиксированной запятой	0,2
Сложение, вычитание с плавающей запятой	6,9
Умножение с плавающей запятой	3,8
Деление с плавающей запятой	1,5
Поиск, сравнение арифметическое	3,8
Извлечение и запись в оперативную память	31,2
Преобразования в оперативной памяти	4,4
Логические операции	1,6
Индексные операции	18,0
Операции специальной арифметики	0,1
Операции управления	16,5
Операции без записи в оперативную память	5,3
Итого	100,0

Для выбора микроЭВМ необходимо знать характеристики решаемых задач (объём входных и выходных данных, коэффициенты сложности обработки входных данных); требования по времени решения и надёжности работы микроЭВМ. Исходные данные приведены в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Исходные данные для выбора микроЭВМ.

Исходный параметр	Обозначение	Значение
1	2	3
Среднее число машинных операций (МОП) для обработки одного входного показателя	$N_{апп}$	100 – 200
Коэффициент увеличения числа МОП за счёт использования вспомогательных операций	$k_{МН}$	2 – 4
Коэффициент увеличения числа МОП за счёт использования контроля	$k_{КН}$	1,2 – 2,2
Коэффициент учёта увеличения МОП за счёт использования общесистемных средств автоматизации	$k_{ТП}$	1,2 – 2,4
Коэффициент понижения быстродействия i -й модели микроЭВМ за счёт обмена информацией между ОЗУ и внешними ЗУ	$k_{бд}$	1 – 1,6
Средневзвешенный коэффициент совмещения работы процессора с работой УВВ	$k_{СВВ}$	0,4 – 0,8
Коэффициент учёта производительности устройства ввода j -го типа при использовании микроЭВМ i -й модели при вводе с канала связи	$k_{СВВiВj}$	0,9
Коэффициент учёта производительности устройств вывода j -го типа при использовании микроЭВМ i -й модели	$k_{ВВВiВj}$	0,8 – 0,9
Заданное допустимое машинное время решения задачи	$T_{зд}$	80 – 100
Число МОП на один входной показатель при решении простейших задач	$N_{пп}$	
Объём вводимых исходных данных с помощью устройств j -го типа	$\Omega_{ВВj}$	
Число устройств ввода j -го типа в i -й модели микроЭВМ	n_{ij}	
Техническая скорость устройства ввода j -го типа при использовании микроЭВМ i -й модели	$v_{ВВiВj}$	
Число параллельно работающих устройств ввода данных j -го типа при использовании микроЭВМ i -й модели	$N_{ВВiВj}$	
Число МОП, необходимых для первичной обработки одного входного показателя	$N_{ПО}$	60 – 80
Коэффициент учёта сложности входных данных при первичной обработке	$k_{ПО}$	
Длительность k -й МОП при использовании микроЭВМ i -й модели	t_{ki}	
Частота появления k -й операции при решении задач данного класса, %	P_k	0,1–31
Число устройств вывода j -го типа в i -й модели микроЭВМ	n^*_{ij}	

Таблица 8.3

1	2	3
Объём выводимых данных при использовании устройств j -го типа		
Техническая скорость устройства вывода j -го типа при использовании микроЭВМ i -й модели	$\Omega_{ВВj}$	
Число параллельно работающих устройств вывода данных j -го типа при использовании микроЭВМ i -й модели	$v_{ВВij}$	
Коэффициент готовности микроЭВМ i -й модели	$N_{ВВij}$	
Коэффициент увеличения вероятности безотказной работы при комплексировании i -х моделей	$k_{Гi}$	
Стоимость микроЭВМ i -й модели	k_{ki}	0,8 – 0,97
Годовой фонд зарплаты персонала, обслуживающего микроЭВМ i -й модели	$z^1_{ЭВМ}$	1,2 – 1,6
Коэффициент, учитывающий увеличение персонала при обслуживании 2-х микроЭВМ i -й модели	$z^1_{ЗПi}$	
3-х микроЭВМ	$k_{ЛСi}$	
4-х и более микроЭВМ		1,2
Коэффициент, учитывающий отчисления на соцстрах		1,5
Коэффициент, учитывающий затраты на ремонт и амортизацию микроЭВМ i -й модели	$k_{СОЦ}$	1,6
Коэффициент, учитывающий прочие расходы	$k_{РЕНi}$	0,05
Коэффициент, учитывающий применение нестандартных устройств	$k_{ПРЧi}$	0,12
Коэффициент, учитывающий затраты на проектирование, монтаж и наладку микроЭВМ	$k_{Н}$	0,1
	$k_{ПРKi}$	1,0 – 1,6
		0,3

Формулы расчета требуемого быстродействия микроЭВМ и объёма вычислений (числа ЭВМ) приведены в табл. 8.3.

Надёжность работы ЭВМ определяется проверкой выполнения условия $P_{зд}(T_{зд}) \leq k_{ki} P_{oi}(T_{зд})$, где $P_{зд}(T_{зд})$ - допустимая вероятность решения задачи без отказов в работе МПС за время $T_{зд}$; $P_{oi}(T_{зд})$ - вероятность безотказной работы ЭВМ i -й модели за время $T_{зд}$; $P_{oi} \approx \exp(-T_{зд}/T_{ЭВМi})$.

8.3. Обоснование устройства сопряжения микроЭВМ с объектом

Системы контроля и управления должны осуществлять автоматическое вычисление совокупных параметров управления, контроля и измерения процессов, различных по своей физической сущности.

Быстродействие и объём вычислений

Расчётный показатель	Обозначение	Формула	Примечание
Время работы устройств ввода данных	$T_{ВВi}$	$\sum_{j=1}^{n_{ij}} \frac{\Omega_{ВВj}}{v_{ВВij} k_{ВВji} N_{ВВji}}$	Последовательно-параллельный ввод
Среднее быстродействие микроЭВМ i -й модели	$v_{ЭВМi}$	$N_{ППЗЭ} = \max(N_{НВi}) + N_{НВi} \sqrt{\sum_k P_{k^1 ki}}$	Параллельный ввод
Время выполнения первичной обработки	$T_{Поi}$	$(\Omega_{ВВj} N_{ПОk} POi) / v_{ЭВМi}$	Арифметический и логический контроль
Время вычисления и формирования выходных данных	$T_{ПРi}$	$\frac{\Omega_{ВВj} N_{ПРk} TPi}{k_{\delta Di} v_{ЭВМi}}$	
Время работы устройств вывода данных	$T_{ВВi}$	$\sum_{j=1}^{n^*_{ij}} \frac{\Omega_{ВВj}}{v_{ВВij} k_{ВВij} N_{ВВij}}$	Последовательно-параллельный вывод
Среднее время решения задач на одной микроЭВМ i -й модели	$T_{ЭВМi}$	$\max_j (\Omega_{ВВj} / v_{ВВij} k_{ВВij} N_{ВВij})$	Параллельный вывод
Число микроЭВМ i -й модели	$N^*_{ЭВМi}$	$[T_{ВВi}(1 - k_{СВВi}) + T_{Поi} + T_{ПРi} + T_{ВВi}(1 - k_{СВВi})] / k_{Гi}$	
		$T_{ЭВМi} / T_{Зд}$	

Связь микроЭВМ с объектом осуществляется посредством устройства сопряжения (рис.8.3, 8.4). Основными целями обработки входной информации в УСО являются предварительная фильтрация (сглаживание) входных сигналов и приведение входной информации к стандартной для микроЭВМ форме. Реализация алгоритмов сглаживания сводится к нахождению такой функции $F(t)$, которая даёт наилучшее приближение к заданной. Вид $F(t)$ зависит от изменения во времени параметров состояния контролируемого объекта.

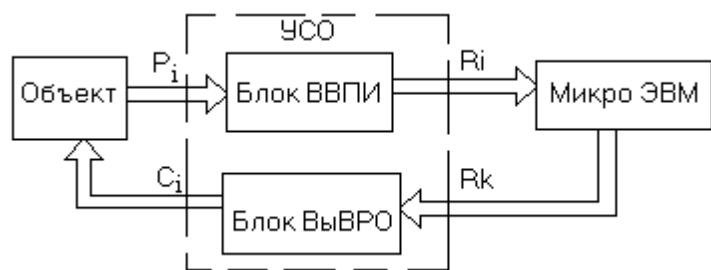


Рис.8.3. Структурная схема связи микроЭВМ с объектом: УСО – устройство сопряжения с объектом; ВВПИ – блок ввода и преобразования информации; ВыВРО – блок вывода результата обработки информации; $P_i = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ – вектор входных процессов; $R_i = \{R_1, R_2, \dots, R_i\}$ – вектор входных кодированных сигналов; $R_k = \{R_{j+1}, R_{j+2}, \dots, R_k\}$ – вектор выходных кодированных сигналов; $C_i = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ – вектор управляющих воздействий на объект.

Информация в цифровой форме вводится в микроЭВМ с помощью последовательного или параллельного интерфейса. При этом необходимо знать следующие данные о входной информации: 1) разрядность r_i входной информации по каждому сигналу; 2) цену младшего разряда для каждого входного сигнала ЦМР; 3) граничные значения диапазона x_{min} и x_{max} ; 4) первую, а иногда и вторую производные сигналов; 5) количество достоверных разрядов r_{oi} ; 6) закон изменения шумов и его параметры; 7) скорость передачи информации v_{ii} ; 8) расстояние от источника передачи информации до микроЭВМ.

При аналоговом представлении входной информации необходимо знать диапазон $x_{min} - x_{max}$; вид аналогового сигнала (медленноменяющийся, синусоидальный процесс, импульсная последовательность и т.д.); полосы частот входного сигнала ΔF и шумов $\Delta F_{ш}$; закон распределения вероятностей шумов и его параметры; погрешность измерения.

В зависимости от структуры УСО могут быть параллельными, последовательными или последовательно-параллельными (рис.8.4). Параллельные УСО (рис.8.4,а) преобразуют информацию датчиков в идентичных каналах, каждый из которых состоит из согласующего усилителя $СУ_i$, фильтра Φ_i (иногда с перестраиваемой структурой или с изменяемыми значениями постоянных времени с помощью управляющих сигналов u_i) и АЦП.

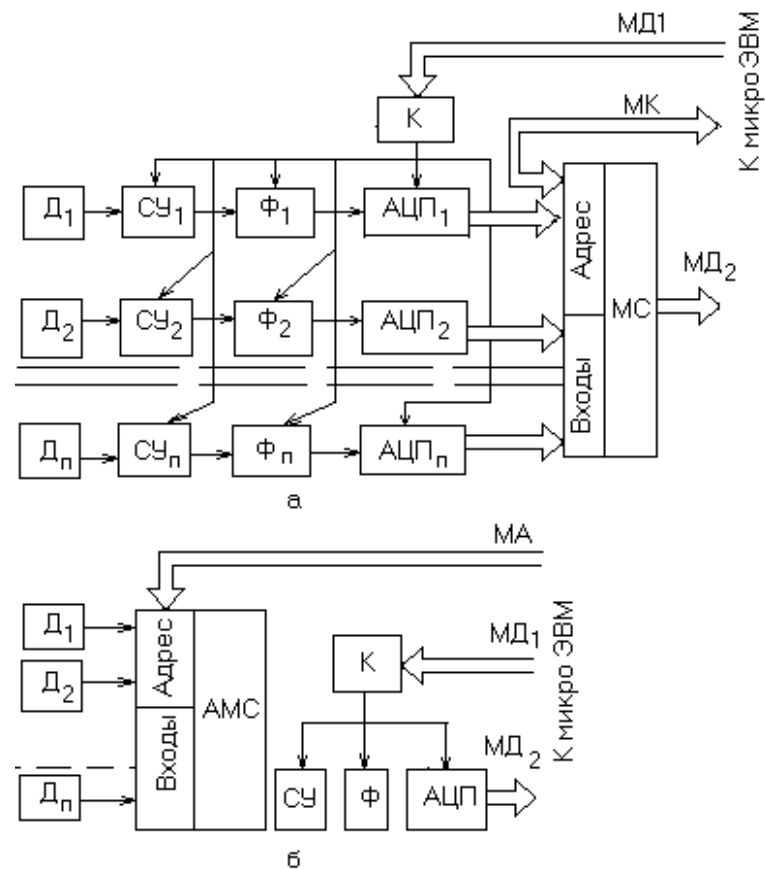


Рис.8.4. Структурные схемы устройств сопряжения с объектом: а – параллельного типа; б – последовательного типа (D_1, \dots, D_n – датчики; $СУ_1, \dots, СУ_n$ – согласующие усилители; Φ_1, \dots, Φ_n – фильтры; $АЦП_1, \dots, АЦП_n$ – аналого-цифровые преобразователи; МС – мультиплексор дискретный; МА – магистраль адреса; МД1, МД2 – соответственно входная и выходная магистраль данных; АМС – аналоговый мультиплексор; К – контроллер).

АЦП_i преобразует аналоговую информацию в дискретную в моменты поступления управляющих сигналов T_i . Мультиплексор МС – общий для каналов передачи цифровых кодов на выходную магистраль данных МД2 микроЭВМ в зависимости от адреса на магист-

рали адреса МА. Входная магистраль данных - МД1. В состав УСО может также входить контроллер К, работой которого управляет микроЭВМ. Контроллер К управляет усилителями, АЦП и фильтрами. В простейшем случае контроллер может не иметь связи с микроЭВМ и работает по жёсткому алгоритму с обеспечением синхронизации от внешних сигналов (например, от тактового генератора). Время преобразования входной информации в параллельных УСО не зависит от числа каналов, а определяется лишь быстродействием блоков, входящих в УСО: $t_{ПАР} = t_K + t_{АЦП}$.

В последовательных УСО сигналы от датчиков D_i поступают через аналоговый мультиплексор АМС на вход усилителя СУ. Выходы фильтра Ф подключаются к входу АЦП. Последовательность коммутации элементов УСО задаётся контроллером К (рис.4,б). Время преобразования в таких УСО возрастает с увеличением числа каналов: $t_{ПОСЛ} = t_K + nt_{АЦП}$.

В последовательно-параллельных УСО сигналы с датчиков объединены в группы с одинаковыми допустимыми временами и точностью преобразования входных данных. Внутри группы реализуется принцип последовательной обработки, а между группами – параллельный. Время преобразования при этом равно $t_{ПОСПАР} = t_K + mt_{АЦП}$, где $m = n/k$ – количество каналов в каждой группе при равномерном распределении; k – количество групп.

В САК и САУ описания норм и контрольно-измерительная информация могут быть представлены по абсолютным значениям или по отклонению от номинального значения. Если границы зоны допуска симметричны относительно c_0 , т.е. $\Delta c_B = \Delta c_H = \Delta c_0$ (рис.8.5), то при определении того, находится ли контролируемая величина в зоне допуска или нет, необходимое количество двоичных ячеек памяти в случае применения способа абсолютных значений

$$N_{ЯА} = \log_2 (C_H C_B x_{max} / \varepsilon^3)$$

а при реализации способа отклонений

$$N_{ЯО} = \log_2 [C_0 \Delta C_0 (\Delta x)_{max} / \varepsilon^3]$$

Разница в количестве ячеек, полученном первым и вторым способами, равна

$$\Delta N_{Я} = N_{ЯА} - N_{ЯО} = \log_2 [C_H C_B x_{max} / C_0 \Delta C_0 (\Delta x)_{max}]$$

Если $c_B > c_0$, $x_{max} > (\Delta x)_{max}$ и $c_H > \Delta c_0$, то $\Delta N_{Я} > I$. Таким образом, при использовании способа отклонений выигрыш $\Delta N_{Я}$ может быть существенным, он ещё более значителен, если УСО будет давать на

выходе сигнал, пропорциональный $\Delta x = c_0 - x$. Поэтому, если есть такая возможность, целесообразен способ отклонений.

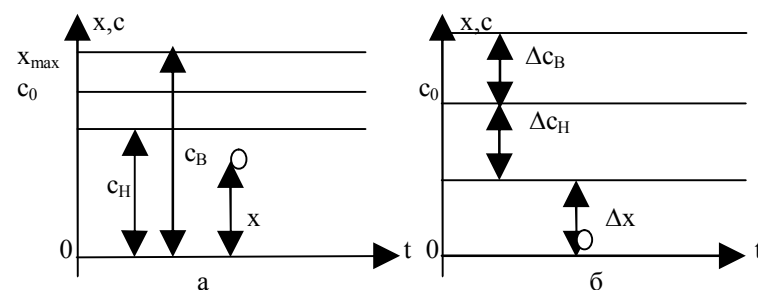


Рис.8.5. Представление контролируемой величины и зон допуска: а - в абсолютных значениях; б - в относительных значениях

Основные показатели, по которым формулируются требования к УСО, сведены в табл.8.4 (даны ориентировочные значения показателей).

8.4. Определение необходимого быстродействия микроЭВМ (МПС) и объёма памяти

Так как в ПСУ присутствует как аналоговая, так и цифровая часть, то при анализе быстродействия считаем, что аналого-цифровое преобразование и последующая обработка сигналов начинается после окончания переходных процессов в цифроаналоговой части, а обратное цифроаналоговое преобразование - после завершения всех операций с кодоимпульсными сигналами. Тогда цифровую часть можно считать элементом системы, вносящим запаздывание $\tau_{Ц}$. В разомкнутых системах, время получения количественной информации будет определяться суммарным временем аналоговых τ_a и цифровых $\tau_{Ц}$ преобразований. МикроЭВМ (или МП), входящая в ПСУ, выполняет основные функции: производит вычислительные и логические операции; управляет работой функциональных блоков системы, обменом информацией между ними, процессами сбора информации от объекта и выдачи информации из системы.

Вычислительные, логические процедуры и операции обмена цифровой информацией могут выполняться в реальном времени, т.е. за некоторую долю $\tau_{Ц}$ интервала времени Δt_P , в течение которого теряется допустимая доля информации об объекте.

Таблица 8.4

Основные показатели УСО

Название	Значения
Тип входных сигналов аналоговых	V, I, R, T^0, f, E , др.
Тип входных сигналов дискретных	Кодоимпульсные, частотно-импульсные, двухпозиционные
Число аналоговых входных сигналов	2-10
Число аналоговых выходных сигналов	2-10
Число дискретных входных сигналов	1-10
Число дискретных выходных сигналов	1-10
Допустимая погрешность измерения, %	1,5-4,0
Погрешность аналоговых сигналов, поступающих в УСО, %	0,5-1,0
Допустимая погрешность выдачи аналогового сигнала, %	$\pm(1-5)$
Частота опроса входных аналоговых сигналов, I/c	500
Время установления выходных аналоговых сигналов, с	0,1-10
Скорость ввода дискретных сигналов, число/с	5000
Время реакции дискретного вывода, с	0,1
Коэффициент подавления помех нормального вида	0,3-0,9
Расстояние УСО от МПС или микро-ЭВМ, м	10
Частота входных аналоговых сигналов, кГц	5-100
Амплитуда входных сигналов, В	0,05-1,0

Примечание: V, I, R, T^0, f, E - физические величины: напряжение, ток, сопротивление, температура, частота, э.д.с. и др.

Эти процедуры могут выполняться с некоторой задержкой $\Delta t_3 > \Delta t_p$, но запись в микроЭВМ исходных для вычислений данных всё равно должна производиться в реальном масштабе времени, а ёмкость памяти микроЭВМ должна обеспечить запись и хранение данных в течение времени Δt_3 . Функции управления должны выполняться только в реальном времени, в течение какой-то доли $\tau_{ц}$, равной $\gamma\tau_{ц}$.

При однопрограммной работе микроЭВМ реальное время $\tau_{ц}$ разделено на часть $\gamma\tau_{ц}$, в течение которой формируются и выполняются служебные сигналы, и на часть $\chi\tau_{ц}$, отведённую на выполнение вычислительных и логических процедур. За время $\chi\tau_{ц}$ микроЭВМ должна принять и записать в память массив данных θ_l (за время $\chi_{SI}\tau_{ц}$), произвести над ним необходимые преобразования $F\theta_l$ (за время $\chi_F\tau_{ц}$) и выдать $F\theta_l$ (за время $\chi_{RI}\tau_{ц}$). Следовательно, микроЭВМ должна иметь скорости ввода и вывода информации соответственно $\theta_l / \chi_{SI}\tau_{ц}$ и $F\theta_l / \chi_{RI}\tau_{ц}$, а при преобразованиях информации в реальном времени – скорость преобразования $F\theta_l / \chi_F\tau_{ц}$.

Когда известно количество элементарных операций N_1, N_2, \dots , необходимых для выполнения заданного преобразования, и время выполнения этих операций $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$, то тогда нужно, чтобы удовлетворялось неравенство $T_f = \sum_{j=1}^n N_j \tau_j \leq N_F \tau_{ц}$, кото-

рое справедливо при разрядности слов, поступающих в микроЭВМ, не превышающим разрядность слова микроЭВМ. Если вычислительные процедуры выполняются с запаздыванием, то интервал $\chi_F\tau_{ц}$ при расчёте не учитывается.

Чтобы оценить возможность использования конкретной микроЭВМ в системе, необходимо прежде всего знать следующие характеристики микроЭВМ: разрядность слова; время записи слова в память; время выдачи слова из памяти; время выполнения элементарных вычислительных операций. Зная количество элементарных операций, необходимых для получения результата, количество операций обращения к памяти микроЭВМ и формирования служебной информации с помощью микроЭВМ, можно определить, достаточно ли быстрое действие микроЭВМ для того, чтобы все эти операции были произведены за заданное время $\tau_{ц}$. Для выбора микроЭВМ по времени выполнения операций проводится примерный подсчёт их объёма. Один из таких способов основан на анализе ранее решаемых аналогичных задач. Например, анализ программы для решения системы n линейных уравнений методом Гаусса показал, что необходимо произвести операции сложения $N_1 = n(n^2 - 1)/3$, умножения $N_2 = n(n^2 - 1)/3$ и деления $N_3 = n(n - 1)/2$. Общее количество элементарных арифметических операций с учетом сложности $N_\alpha = \beta_1 N_1 + \beta_2 N_2 + \beta_3 N_3$. Неарифметические операции увеличивают общий объём до $N = kN_\alpha$, где k доходит до 3-4. Если программирование ведётся на языке высокого

уровня, то необходимо ввести ещё один множитель, который обычно равен 2-3. Когда алгоритм решения задачи разработан, то можно уточнить требуемый объём вычислительных затрат, оформив их в виде табл.8.5.

Таблица 8.5

Количественные характеристики вычислительных затрат

Характеристики	Условные обозначения	Численные значения
Количество операций		
1) ввода – вывода	N_1
2) передышки	N_2
3) сложения – вычитания	N_3
4) умножения	N_4
Всего операций	$N_0 = \sum_i^4 N_i$
Количество операндов	N_ω
Количество констант	N_γ

Основным фактором, определяющим форматы и адресность, является принятая к реализации в микроЭВМ система команд. Например, один из основных форматов микроЭВМ PDP (аналог "Электроника-60") показан на рис.8.6. (здесь 10 разрядов служат для указания кода операции, 3 – для кодирования номера регистра и 3 – для указания способа адресации).

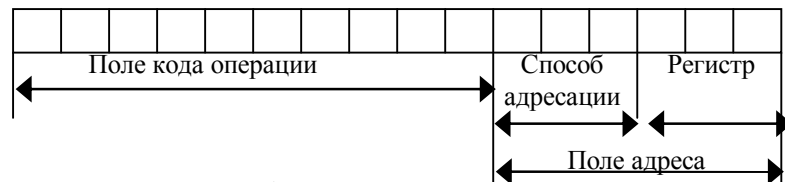


Рис.8.6. Пример формата команд микроЭВМ

В формате команды число разрядов, отводимых для описания кода операции, определяется типом микропроцессора, а число адресов и их разрядность – ёмкостью памяти для хранения программ и временем их решения. Выбор адресности осуществляется по двум критериям: минимумам объёма памяти для хранения программ и времени решения задачи. При выборе адресности по первому критерию преимуществ

в большинстве случаев имеют программы для одноадресных машин, а по второму проводится оценка выигрыша времени решения конкретной задачи на ЭВМ (МПС) с различной адресностью.

Оценка типовых алгоритмов показывает следующие случаи: 1) последовательного алгоритма, когда результат предыдущей операции непосредственно используется в следующей, одноадресная ЭВМ (МПС) обладает преимуществом; 2) параллельного алгоритма, когда результат предыдущей операции не используется в следующей, а отсылается в оперативную память, трёхадресная ЭВМ (МПС) предпочтительнее, так как при этом для одноадресной ЭВМ (МПС) на каждую арифметическую операцию приходится две вспомогательные (вызов из памяти в арифметико-логическое устройство (АЛУ) и засылка в память); 3) комбинированного алгоритма, когда его составляющие имеют последовательный и параллельный характер, выигрыш равен $\Delta t = 2\tau_0(N_{A2} - N_{A1} - N_Y)$, где N_{A2} - число арифметических операций, выполняемых в виде параллельного алгоритма, N_{A1} - число арифметических операций, выполняемых последовательно, N_Y - число управляющих команд, τ_0 - время цикла обращения к памяти. Если $N_{A2} > (N_{A1} + N_Y)$, то $\Delta t > 0$ и преимущество имеет трёхадресная ЭВМ (МПС); при $N_{A2} < (N_{A1} + N_Y)$ имеем $\Delta t < 0$ и целесообразнее применение одноадресной ЭВМ (МПС). Разрядность адреса определяется количеством ячеек памяти, количеством источников и приёмников информации, а также способами адресации.

Система памяти микроЭВМ (МПС) обычно состоит из ОЗУ для хранения вводимой информации и промежуточных результатов вычислений, ППЗУ – перепрограммируемого постоянного ЗУ и ПЗУ – постоянного ЗУ для хранения рабочих программ, тестов и т.д.

При пользовании в микроЭВМ (МПС) прямой адресации разрядность определяется так:

$$R_a = \text{ent} [\log_2 (N_{OЗУ} + N_{ППЗУ} + N_{ПЗУ} + N_{И} + N_{П})]$$

где ent – целая часть числа (функция Ентье).

При относительной адресации обеспечивается сокращение адресной части команды, так как она является смещением относительно определённого регистра процессора. Чаще всего в качестве регистра применяется счётчик команд. При $R_a = 8$ можно охватить до 256 адресов относительно программного счётчика.

При индексной адресации адресная часть команды рассматривается как смещение относительно индексных регистров процессора. При этом уменьшается разрядность адресной части команды. Испол-

нительный адрес формируется как сумма содержимого индексного регистра и R_a .

1. Оценка объема памяти ОЗУ

Исходные данные: число входных a и выходных b величин, применяемых в алгоритмах; число одновременно хранимых на каждом i -м этапе вычислений промежуточных величин q_i^k для каждого k -го алгоритма; число уровней прерывания n .

Так как каждый входной параметр заносится в одну ячейку ОЗУ и после обработки вводится в другую, то объем памяти для хранения входных и выходных величин должен быть равен $N_{a,b} = 2a + b$, для хранения промежуточных величин $N_{ПП} = \sum_{k=1}^n \left(\max_i \{ q_i^k \} \right) + nq_n$, где q_n - количество ячеек памяти для хранения рабочих регистров микропроцессора, необходимых для запоминания по прерванной программе. С учётом средств программной защиты от помех и программ предварительной обработки информации объём ОЗУ

$$N_{OЗУ} \geq 1,4 \left[2a + b + \sum_{k=1}^n \left(\max_i \{ q_i^k \} \right) + nq_n \right],$$

а также с учётом объёма тестовых N_T и стандартных $N_{СТ}$ программ

$$N_{OЗУ} = N_{OЗУ}^o + N_T + N_{СТ}.$$

2. Оценка объёма памяти ПЗУ

Объём памяти ПЗУ складывается из объёмов рабочих программ $N_{РПi}$ для реализации всех k алгоритмов управления: управляющей программы-диспетчера N_D ; тестовых программ N_T ; стандартных программ $N_{СТ}$; ячеек для хранения констант N_C , т.е.

$$N_{ПЗУ} = \sum_{i=1}^k N_{РПi} + N_D + N_{П} + N_T + N_{СТ} + N_C.$$

Окончательно $N_{ПЗУ}$ определяется после составления и отладки программ с учётом выбранной системы команд.

3. Оценка объёма памяти ППЗУ

Объём $N_{ППЗУ}$ определяется системными требованиями, предъявляемыми к ПСУ. Например, пропадание питающих напряжений в микроЭВМ (МПС) приводит к потере набранной и хранимой в ОЗУ информации, если не приняты специальные меры.

В зависимости от технических возможностей устранение потери информации может быть реализовано перезаписью в момент времени восстановления питания невосстанавливаемых величин в ППЗУ; по-

стоянным хранением всех невосстанавливаемых величин в ППЗУ. Требуемый объём ППЗУ в первом случае

$$N_{ППЗУ} = \max (N_{НВи}) + N_{НВО};$$

$$\text{во втором случае } N_{ППЗУ} = \sum_{i=1}^n N_{НВи} + N_{НВО},$$

где $N_{НВи}$ - число невосстанавливаемых величин, которые используются только в i -м алгоритме; $N_{НВО}$ - число невосстанавливаемых величин, которые являются общими для нескольких алгоритмов.

4. Определение длины разрядной сетки

Основными требованиями, предъявляемыми к ПСУ, являются выработка управляющих воздействий y_i на объект контроля или извлечение информации о нём с погрешностью не более $\delta_{ДОП}$ и временем запаздывания не более допустимого $\Delta t_{ДОП}$, т.е. при разработке систем на микроЭВМ накладываются ограничения

$$\left. \begin{aligned} \sigma_i &\leq \sigma_{ДОП}; \\ \Delta t_i &\leq \Delta t_{ДОП}, \end{aligned} \right\}$$

где σ_i , Δt_i - погрешность и время запаздывания выработки i -го воздействия (погрешность извлечения информации и допустимое время обработки информации об объекте).

В свою очередь, $\sigma_i^2 = \sigma_{Иi}^2 + \sigma_{Мi}^2 + \sigma_{Ai}^2$, где $\sigma_{Иi}$, $\sigma_{Мi}$, σ_{Ai} - средние квадратичные значения погрешностей: идентификации, методической и аппаратурной.

Причиной возникновения погрешности идентификации является замена истинной математической модели объекта $y_i^* = f^*(x_1, x_2, \dots, x_n)$ и соответственно требуемого управляющего воздействия упрощённым $y_i = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Методические погрешности определяются методом извлечения информации об объекте и создании функции воздействия на объект контроля. Третья составляющая σ_{Ai} вызвана ограниченностью длины разрядной сетки, используемой для представления величин в микроЭВМ (МПС). Выбором длины разрядной сетки требуется обеспечить выполнение $\sigma_{Ai}^2 \leq \sigma_{ДОП}^2 - \sigma_{Иi}^2 - \sigma_{Мi}^2$.

8.5. Выбор технических средств, входящих в ПСУ

Все средства, образующие ПСУ, распадаются на три вида по своему отношению к двунаправленному потоку информации, связывающему оператора с объектом: средства обмена информацией,

средства управления, обработки и хранения информации и вспомогательные средства, которые обеспечивают функционирование первых двух видов средств. Классификация средств приведена в табл.8.6.

При рассмотрении ПСУ выделяют конструктивные, энергетические и информационные структуры. Структура конструкции системы содержит информацию о механическом взаимодействии её элементов (компонентов схемы, плат, модулей блоков, каркасов, стоек и т.д.). Структура энергетических связей содержит информацию об источниках и потребителях электрической энергии, необходимой для работы элементов системы. Структура информационных связей содержит информацию о том, как происходит обмен информацией между элементами системы, объектом и системой, оператором и системой. Она является наиболее важной и первичной по отношению к другим структурам. Поэтому важнейшими свойствами ПСУ является её способность обеспечения в нужной форме в заданное время требуемой информации с заданными характеристиками, а критерием качества системы могут служить минимальные суммарные затраты на достижение этой цели.

Внутренняя структура системы должна строиться так, чтобы обеспечить преобразование потока информации, получаемого от объекта, в требуемую для оператора форму. Это общее условие распадается на ряд частных требований, связанных с количественными и качественными показателями конкретного источника информации. Удовлетворение этих частных требований и определяет информационную структуру системы. Решение задачи системного обмена информацией обеспечивается выбором эффективных методов обмена информацией между элементами системы, оптимальным выбором алгоритмов и средств её обработки, уменьшающих интенсивность информационных потоков.

Количественную сторону системного обмена информацией характеризуют следующие показатели: количество источников и потребителей (приемников) информации; расположение источников и приемников в пространстве; мощность входных и выходных потоков информации; интенсивность информационных потоков и др.

Графически информационная структура системы изображается в виде соединения прямоугольников, внутри которых имеется название или условное обозначение устройств, составляющих систему. Двойными линиями со стрелками показываются информационные связи, по которым идёт обмен дискретными (кодowymi) сигналами, а одинарными – связи, по которым идёт обмен аналоговыми или импульсными сигналами.

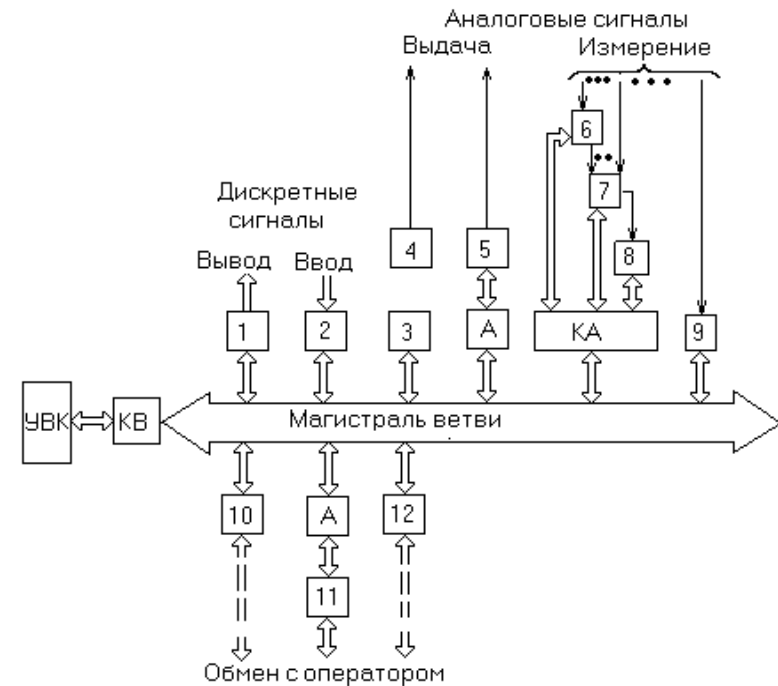
Классификация средств, входящих в состав микропроцессорных ПСУ

Таблица 8.6

Группа средств	2	3	4	5
1	Аппаратные средства		Программные средства	
1	Подгруппа	Примеры	Подгруппа	Примеры
1. Обмена информацией с объектом (получение информации)	Средства измерения Средства выдачи информации Средства получения (ввода) дискретных сигналов Средства выдачи дискретных сигналов Средства измерения температуры, влажности, давления, скорости, расхода и др.	Преобраз. микруик, блоки для измерения и коммутации аналоговых сигналов и преобразования их в цифровой форму Каналы ввода, преобразователи аналоговых сигналов, преобразователи температуры, влажности, давления, скорости, расхода и др. Позиционные, кодовые, световые, фотоэлектрические, потенциометрические, индукционные, оптические датчики, датчики давления, температуры, угла поворота, световые датчики и др.	Программное обеспечение (ПО) ввода информации, ПО обработки результатов измерения, ПО подсчета информации и взаимодействия с периферийными устройствами, ПО управления объектом	Примеры Приводных устройств Программное обеспечение (ПО) ввода информации
2. Обмена информацией между оператором и системой	Средства ручного управления Средства представления информации Средства документирования	Клавиатура, пульты дистанц. кн., мышь, сканеры, сенсоры, печатающие устройства (принтеры), графопостроители	ПО ввода - вывода информации и символов; ПО терминального ввода - вывода; программно ориентированные языки, программные средства ведения диалога, программные инструменты ввода (печатн); программные средства и инструменты ввода информации	Примеры Приводных устройств Принтеры Печатные устройства Базы данных Графические инструменты

Продолжение табл. 8.6

1	3. Системного обмена информацией (интерфейсы)	2	3	4	5
4. Управление, обработка и хранение информации	Средства сопряжения Средства передачи Средства ввода – вывода (интерфейсы) Средства межмашинной связи	Средства сопряжения Средства передачи Средства ввода – вывода (интерфейсы) Средства межмашинной связи	Контроллеры ветвей, адаптеры Модемы, крайги, кабели Дискосоды, считыватели Блоки, модули межмашинной связи	ПО системного обмена ПО мультипроцессорной среде анисации и межпроцессорной связи	Драйверы Селевые повольные системы
	Средства сопряжения Средства передачи Средства ввода – вывода (интерфейсы) Средства межмашинной связи	Процессоры Прочие машинные средства Отрабатывающие устройства заполняющие устройства (ЗУ) Центрополмикровые ЗУ Постопные ЗУ	8- и 16-разрядные Контроллеры трактоов, таймеры Полупроводниковые ЗУ ШПЗУ, диски, ленты, Внешнествский диск, НЗУ (полупроводниковые)	Операционные системы Системы управ ления базами данных Средства защиты данных	Дистрибуционные распределённые Средства защиты цркт перев аптис, от несаиспирное анного доступа
5. Вспомогательные	Несущие конструкции Источники питания Средства микрополитического обеспечения Средства тестирования Сервисное оборудование	Средства микрополитического обеспечения Средства тестирования Сервисное оборудование	Кармасы, блоки, кожухи, стойки, тумбы Модули встроённые, аккумуляторы Источники образцовых сигналов, встроённые меры Вспомогательные пульты, ручные контроллеры, проверочные стенды Программаторы, монтажные стенды	ПО тестирования устройств ПО тестирования программ ПО метрологического обеспечения Средства обеспечения надёжности и жизучести Сервисные средства а	Тестовые программы Программы повока инструментальной Программы типа МЕНЮ и HELР, контрольно- демонстрационные эле 3 значае, структурные варианты



ПСУ чаще всего выполняются так же, как и измерительно-вычислительные комплексы (ИВК), на базе управляющих вычислительных комплексов (УВК), которые включают в себя средства управления, обработки и хранения информации, оперативно-диспетчерское оборудование для обмена информацией с персоналом (рис.8.7). Остальные аппаратные средства, входящие в ПСУ, служат для получения информации об объекте и её преобразования для подачи в микроЭВМ (МП).

Рис.8.7. Структурная схема измерительно-вычислительного комплекса: УВК – управляющий вычислительный комплекс; КВ - контроллер ветви; А – адаптер; КА – коллективный адаптер; 1 – устройство вывода информации дискретных сигналов; 2 – устройство ввода кодов сигнала; 3, 5 – устройства выдачи аналоговых сигналов на объект управления; 4 – устройство сопряжения с объектом; 6-9 – средства измерений аналоговых сигналов; 10, 11 – оперативно-диспетчерское оборудование; 12 – сервисное устройство.

Если устройство не может быть непосредственно подключено к магистрали, оно связывается через согласующее устройство-адаптер (А). Применяются также коллективные адаптеры (КА), обслуживающие несколько устройств. Непрерывные и дискретные сигналы могут поступать непосредственно на устройства, связанные с магистралью, или через устройства, работающие в автономном режиме. К магистрали ветви могут подключаться устройства, выполняющие функции обмена с персоналом, и вспомогательные устройства.

На рис.8.7 в качестве примера к магистрали ветви подключены устройства вывода 1, ввода 2, выдачи 3 и 5 (через адаптер А), причём устройство 3 выдает на объект сигналы через автономное устройство сопряжения 4. Средства измерений 6-8 подключены к магистрали ветви через КА. Кроме того, к ней подсоединены измерительное устройство 9, оперативно-диспетчерское оборудование 10, 11 (через А) и сервисное устройство 12.

Магистральная ветвь позволяет осуществить наращивание аппаратных средств. При использовании в качестве магистрального интерфейса УВК функции КВ сводятся к согласованию электрических сигналов (в этом случае такие КВ являются расширителями магистрали). Все применяемые в настоящее время магистрали предусматривают параллельно-последовательный способ обмена информацией и реализуются в виде многопроводных шин с высокой скоростью изменения логических сигналов. Поэтому структура (см. рис.8.7) применяется только при разработке сосредоточенных (в пределах нескольких метров) или локализованных (в пределах до 20 м) ИВК. Применение распределенных на большом пространстве ПСУ в данном пособии не рассматривается.

Основными аппаратными средствами получения информации, входящими в систему извлечения информации, являются модули, агрегатированные в каркасы, частичные блоки, приборы и субкомплексы.

Модули – устройства, конструктивно расположенные на одной или нескольких печатных платах стандартного размера, выполняющие, как правило, одну или несколько определённых функций измерения, преобразования, выдачи, коммутации непрерывных, ввода и вывода дискретных сигналов. В состав модуля входят узлы, выполняющие указанные функции, а также узлы для выполнения функций системного обмена с магистралью, расположенной в каркасе (крейте). Конструктивное исполнение модулей рассчитано на их размещение в определённом типе каркаса (крейта).

Частичные блоки – устройства для преобразования входных или выходных сигналов системы извлечения информации. Первая подгруппа средств – нормирующие преобразователи – осуществляет преобразование сигналов датчиков в нормальные по уровню электрические сигналы, которые по разным причинам (повышенная мощность и напряжение, наличие пульсаций и помех, условия искробезопасности и др.) не могут быть непосредственно поданы на вход модулей или приборов.

Приборы – автономные устройства, имеющие, как правило, более высокие, чем у модулей, нормированные метрологические характеристики. Субкомплексы являются дальнейшим развитием приборов по числу измеряемых физических величин и числу измерительных каналов.

Агрегатирование аппаратных и программных средств, нормативного, методического, эксплуатационного обеспечения и стандартов в систему образует управляющий вычислительный комплекс. Стандарты обеспечивают совместимость и унификацию системных, архитектурных и конструктивных решений для построения УВК. Набор аппаратных средств УВК позволяет с минимальной избыточностью компоновать разнообразные системы извлечения информации. Полный набор аппаратных средств УВК делится на следующие основные группы: вычислительные и системные периферийные устройства (собственно микроЭВМ (МП), внешняя память и средства ввода – вывода); устройство сопряжения с объектом; устройства связи оператора с УВК (оперативно-диспетчерское оборудование); устройства передачи данных (средства межмашинного обмена).

Программное обеспечение (ПО) УВК, т.е. совокупность программных средств, позволяющих пользователю применить микроЭВМ (МПС) и все входящие в УВК устройства, состоит из внутреннего и внешнего: внутреннее ПО включает систему автоматизации программирования, операционные системы, систему функционального контроля; внешнее ПО образует пакеты прикладных программ и специализированные программные системы.

Основные характеристики некоторых современных отечественных микроЭВМ, приемлемых для создания ПСУ, приведены в табл.8.7-8.8, а параметры внешних ЗУ (ПЗУ) – в табл.8.9.

Средства системного обмена делятся на три группы: средства межмашинной связи (СМС), контроллеры ветвей (КВ), адаптеры (А). СМС и КВ связывают между собой системные магистральные или

радиальные интерфейсы, адаптеры – системный интерфейс с прибором или периферийным устройством.

Таблица 8.7

Параметры микроЭВМ (выпускавшихся в 90-е годы)

Параметр	Тип микроЭВМ				
	ДВК-2М	Э-60М	ЕС-1840	БК-0010	Искра-226
Разрядность ЦП, бит.	16	16	16	16	16
Набор команд ЦП	РФз	Пз	РФз		
Производительность, операций/с					
Рг – Рг	550	250	106	$3 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^5$
Рг – ОП	250	130			
Пз (умножение)	20	20		$8 \cdot 10^4$	
Ёмкость ОЗУ пользователя, Кбайт	64	64	256-640	32	128
Быстродействие программного канала ввода-вывода, Кбайт/с	30	20			
Быстродействие КПДП, Кбайт/с	150	150			
Время выполнения прерывания, мкс	8	12			
Системный интерфейс	МПИ ОС ДВК (РАФОС)	МПИ	СР/М86 ФОБОС	МПИ М86	
Штатная ОС					
Время выполнения команд в машинных кодах, мкс			0,4-37,8	0,4-37,8	0,4-37,8
Языки программирования			Бейсик	Фокал, Бейсик	Бейсик, Паскаль

Примечание: ЦП – центральный процессор, Рг – регистр, ОП – оперативная память, Пз – набор инструкций о плавающей запятой, ОЗУ – оперативное запоминающее устройство, КПДП – канал прямого доступа к памяти, РФз – расширенный набор инструкций с фиксированной запятой.

Таблица 8.8

Параметры современных микроЭВМ

МикроЭВМ	ППЗУ, кбайт	ОЗУ, байт	F _{max} , МГц	Разрядность, бит	Машинный цикл, мкс	Число и разрядность портов ввода-вывода	Разрядность таймера, бит
1816 BE 39	—	128	11,0	8	—	—	—
1816 BE 48	1	64	6,0	8	—	—	—
1816 BE 49	2	128	11,0	8	—	—	—
К 1816 BE 51	4	128	12,0	8	1,0	4×8	2×16
580	—	—	2,0	8	--	—	—
КМ 1810 ВМ 89	4	—	5,0	16	3,4	—	—
581	—	16к	3,3	16	—	—	—
1801	4	—	8,0	16	—	—	—
INTEL 8041A	1	64	6,0	8	2,5	2×8	8
INTEL 8042	2	128	12,0	8	1,25	2×8	8
INTEL 80452	8	256	16,0	8	0,75	5×8	2×16
INTEL 8089	4×16	256	12,0	16	1,25	5×8	2×16
TMS 320	1,5×16	144	—	16	0,2	1×16	—
TMS 320 C31	—	32×32	—	32	0,05	—	—
IMST 424	—	4к	5,0	32	0,02	1×8	32

Таблица 8.9

Параметры ПЗУ (внешнего ЗУ)

Параметр	Значение параметра ПЗУ		
	НМД	НМД (кассетный)	НГМД
Ёмкость памяти, Мбайт	20-80	2,4-9,6	0,12-1,6
Время доступа, мс	16-170	25-85	
Скорость обмена информацией, Мбайт/с	0,5-1,2	0,6-1,2	0,031

Способы и алгоритмы передачи управления ветвью зависят от вида интерфейса ветви и конкретной реализации аппаратных и программных средств, обеспечивающих работу контроллера. КВ выполняет функции управления интерфейсом ветви в объёме, преду-

смотренном спецификациями интерфейса. Структура КВ определяется требованиями согласования контроллера с интерфейсом ветви, которые реализуются на нескольких иерархических уровнях. Первый уровень – физический – обеспечивает соблюдение требований интерфейса ветви в отношении параметров принимаемых и выдаваемых электрических сигналов. Второй – логический (канальный) – обеспечивает требуемые логические и временные соотношения между сигналами в магистрали при обмене информацией, а также приёме и передаче управления магистралью ветви. Третий – управляющий – организует системное функционирование КВ. Обобщённая структура контроллера верхнего уровня системной иерархии, когда управление производится "сверху вниз" и контроллер является средством связи "верхнего" и "нижнего" интерфейса, приведена на рис. 8.8.

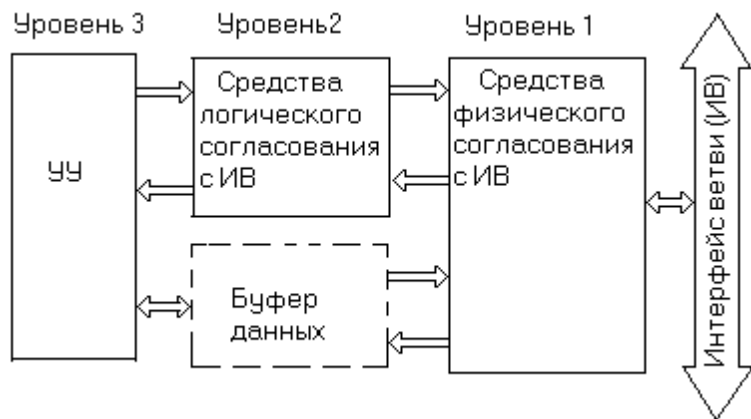


Рис.8.8 Обобщенная структурная схема контроллера верхнего уровня системной иерархии (УУ – управляющее устройство).

Средства физического согласования с интерфейсом ветви обеспечивают преобразование внутренних сигналов контроллера в сигналы интерфейсов ветви, параметры которых определены спецификациями данного интерфейса. Такие средства реализуются на стандартных магистральных элементах и не зависят от типа используемого контроллера. Средства логического согласования обеспечивают приём и выдачу контроллером сигналов интерфейса в соответствии с временными и логическими соотношениями, задаваемыми в спецификациях интерфейса. Эти сигналы делятся на группы: сигналы управления обменом данными; сигналы запроса и управления прерываниями; сигналы за-

проса и управления прямым доступом к памяти; сигналы управления интерфейсом ветви; сигналы управления запросами, арбитражем и захватом магистрали интерфейса ветви; специальные сигналы (аварийные и т.п.). Сигналы первой и четвертой групп присутствуют в любом КВ, другие сигналы могут отсутствовать.

Следующий уровень – управляющий. В контроллере верхнего уровня системной иерархии устройство управления (УУ) – это совокупность программных и аппаратурных средств ЭВМ. Управление осуществляется посредством совокупности сигналов, набор и синхронизация которых определяются спецификой применяемого вычислительного средства.

Адаптеры различаются по типам интерфейсов, согласование с которыми они обеспечивают, по объёму выполняемых интерфейсных функций, по конструктивному исполнению. Кроме основной, адаптер может выполнять ряд вспомогательных функций (диагностика, контроль передаваемой информации, преобразование форматов данных). Характеристиками адаптера являются: быстродействие, объем передаваемой или принимаемой информации, приоритетность этой информации в системе и т.д. Структура любого адаптера состоит из двух основных частей: интерфейсной – непосредственно связанной с интерфейсом ветви, и приборной – связанной с входом (выходом) подключаемого периферийного устройства. Конструктивно адаптеры могут выполняться в виде модулей, входящих в каркас и связанных с магистральным интерфейсом; в виде узлов, подключаемых устройств и сменных блоков.

Оперативно-диспетчерское оборудование обеспечивает решение следующих задач: ввод, редактирование и отладка программ; ручное управление процессом получения и обработки измерительной информации; считывание результатов испытаний, контроль и диагностика работоспособности системы. Средства ручного ввода информации в системах извлечения информации представлены различными клавиатурами, регулировочными органами и т.д. Алфавитно-цифровые (символьные) клавиатуры обладают универсальностью, имеют стандартный состав и взаимное расположение клавиш, хорошие эргономические характеристики при размещении клавишного поля под углом 5-15° по отношению к горизонтальной плоскости. Большинство серийно выпускаемых клавиатур обеспечивает ввод информации в устройство обработки в стандартных кодах обмена информацией. В случае, когда число вариантов вводимых сообщений невелико, целесообразно применение функциональных клавиатур,

обладающих лучшими эргономическими характеристиками при числе вводимых сообщений (функций) не более 40-50, не требующих жестких ограничений на размещение клавишного поля (оно может быть размещено под оптимальным для оператора углом 0-75°).

В большинстве современных средств отображения информации используется растровый принцип формирования изображений, обеспечивающий по сравнению с сегментным более высокую надежность, лучшие эргономические характеристики, универсальность, он пригоден для отображения информации в символьной и графической форме.

Быстродействие современных систем обработки сигналов ограничивается скоростью обмена данными между объектом и микроЭВМ. Сбор и обработка измерительных данных в таких системах могут производиться в двух основных режимах: в реальном масштабе времени и в режиме с разделением времени. В первом случае измерительная информация поступает непосредственно с аналого-цифрового преобразователя – АЦП (под АЦП в данном случае подразумевается любой вид преобразования исходного сигнала в коды микроЭВМ) или с АЦП через коммутатор в запоминающее устройство микроЭВМ (МПС), где подвергается обработке по заданному алгоритму. Во втором случае результаты измерений поступают на промежуточное буферное ЗУ (ОЗУ, магнитные диски), где запоминаются на определенное время. Передача данных на микроЭВМ (МПС) производится либо в ручном (путем постановки соответствующего диска), либо в автоматическом (через соответствующий интерфейс) режиме после накопления определенного объема информации или по команде оператора.

Основными достоинствами систем, работающих в реальном масштабе времени, являются сравнительно низкая стоимость и простота конструктивного исполнения. В системах с разделением времени необходимо использование дополнительных ЗУ. Скорость обмена информацией между буферным ЗУ и микроЭВМ (МПС) при этом уже не так критична, поэтому такая структура системы является более предпочтительной при обработке быстропротекающих (переходных и импульсных) процессов, если достаточна емкость ЗУ. В современных системах анализа переходных процессов применяются обычно способы запуска АЦП по заданным параметрам его выходного сигнала.

Применение серийных цифровых приборов, обеспечивающих преобразование аналогового сигнала в коды машин (цифровые вольтметры, мультиметры, частотомеры и др.), в ПСУ, хотя и обеспечивает более высокие метрологические показатели, однако резко увеличивает стоимость систем. Модульные средства измерений, входящие в ИВК,

выполняют те же функции, что и приборы. Они делятся на две группы: нормирующие преобразователи и АЦП. Нормирующие преобразуют сигналы от датчиков неэлектрических величин в унифицированный сигнал напряжения или тока (применяются при необходимости нормирующие преобразователи электрических сигналов). Они могут иметь несколько входов и выходов, которые подключаются к входу другого преобразователя, коммутатора или АЦП. Сигнал с выхода АЦП в виде дискретных сигналов (кодов) поступает на магистраль ИВК либо непосредственно через интерфейсный узел, либо через устройство гальванической развязки. При необходимости между магистралью и выходом АЦП устанавливается буферное ЗУ.

Тема 9. Алгоритмическое и программное обеспечение микропроцессорных программируемых систем управления

9. 1. Классификация алгоритмов функционирования ПСУ

Основные классификационные признаки алгоритмов функционирования ПСУ даны на рис. 9.1. Логические алгоритмы ограничиваются выполнением операций сравнения контролируемых параметров с допустимыми пределами их измерения и некоторых логических операций. Вычислительные алгоритмы наряду с логическими обеспечивают выполнение математических операций: экстраполяцию, интерполяцию, линеаризацию, интегрирование, все арифметические действия и др.

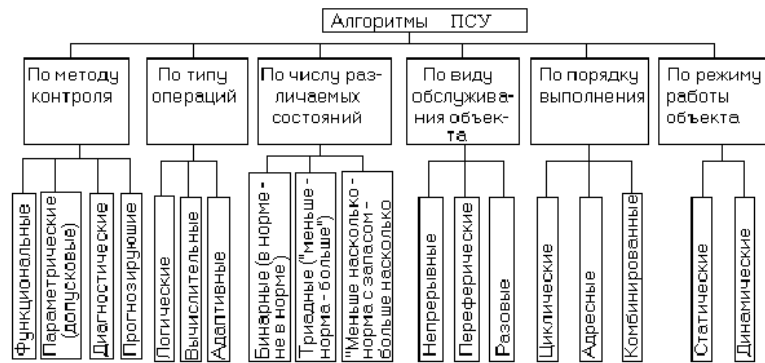


Рис. 9.1. Классификационные признаки алгоритмов функционирования микропроцессорных ПСУ

Адаптивные алгоритмы реализуют функции самообучения и оптимизации процесса обработки информации в зависимости от изменения внешних факторов и внутренней структуры объекта контроля. Они обеспечивают исправление ошибок, заложенных в исходных алгоритмах, и некоторую оптимизацию процесса контроля и управления. Эти алгоритмы могут изменяться в зависимости от предшествующих результатов. Алгоритмы функционального контроля не предусматривают количественной оценки с установленной заранее погрешностью, а состояние объекта оценивается по некоторым качественным реакциям на внешние или искусственные (тестовые) воздействия. Непрерывные алгоритмы присущи встроенным системам контроля сложных автоматически восстанавливаемых систем. Их цель – за время выполнения объ-

ектом основной задачи обнаружить неисправность и автоматически включить резерв или провести регулировку параметра, значение которого вышло за допустимое, или в случае невозможности восстановления в заданное время дать информацию о необходимости передачи выполнения задания другому объекту. Алгоритм функционирования систем контроля связан с проблемами алгоритмизации задач контроля и с построением оптимальной с точки зрения технико-экономических критериев аппаратуры контроля.

9.2. Организация ввода-вывода информации

Эффективность использования микроЭВМ (МПС) в значительной степени зависит от её способности взаимодействовать с непрерывной частью измерительной системы. Для организации обмена данными между внешними устройствами и микроЭВМ (рис.9.2) используется интерфейс ввода-вывода (ИфВВ), являющийся составной частью микроЭВМ (МПС) и выполняющий стандартное сопряжение устройств управления внешними устройствами и каналов ввода - вывода (в понятие интерфейса ввода-вывода входят совокупность интерфейсных схем, шин и правил обмена данными).

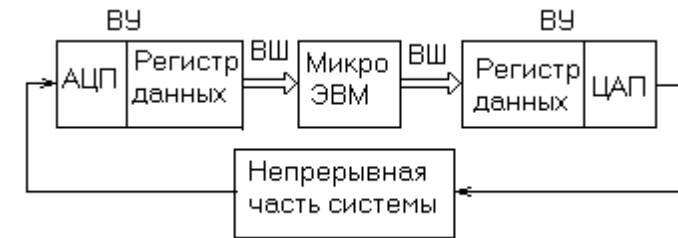


Рис.9.2. Структурная схема обмена данными между внешними устройствами и микроЭВМ (МПС)

ИфВВ зависит от характеристик потока данных внешних устройств, структуры системной шины, режима передачи данных (последовательного или параллельного) и метода организации ввода-вывода (рис.9.3).

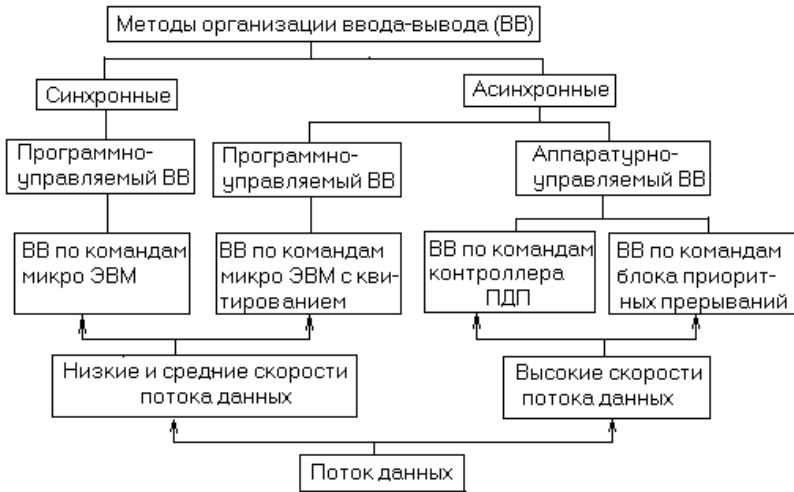


Рис.9.3. Классификация методов ввода-вывода данных в микроЭВМ (МПС)

При синхронном обмене информация поступает непрерывной последовательностью синхронно с тактовой частотой сигнала или в определённой временной последовательности. С начала обмена данными внешнее устройство должно обязательно обслуживаться процессором, иначе информация будет потеряна. Если скорость передачи данных низкая, применяется программно-управляемый интерфейс. В случае, если скорость передачи данных высока, применяется аппаратно-управляемый ввод-вывод данных, в частности, прямой доступ к памяти (ПДП). Синхронный обмен данными обычно производится при работе с электромеханическими внешними устройствами. Асинхронные методы организации ВВ связаны с прекращением выполнения микроЭВМ (МПС) текущей или невыполнением очередной команды рабочей программы. При программно-управляемом асинхронном ВВ микроЭВМ (МПС) может находиться в режиме ожидания, в который она попадает по командам ВВОД или ВЫВОД рабочей программы. Это состояние продолжается до поступления сигнала ГОТОВНОСТЬ от внешних устройств. Такой способ организации ВВ, основанный на взаимном обмене информацией о состоянии, называемый квити́рованием, позволяет добиться синхронизации различных по быстродействию микропроцессорных средств и внешних устройств. Хотя при этом и могут быть потери машинного времени на ожидание. От этого не-

достатка свободен асинхронный ВВ с прерыванием программы по запросу внешнего устройства.

При этом при поступлении сигнала запроса микроЭВМ после выполнения текущей команды выдаёт сигнал на разрешение прерывания и далее реализует подпрограмму обслуживания прерывания, обеспечивающую, например, ввод или вывод данных. Дальнейшее повышение скорости обмена данными между внешними устройствами и памятью микроЭВМ (МПС) достигается использованием режима прямого доступа к памяти.

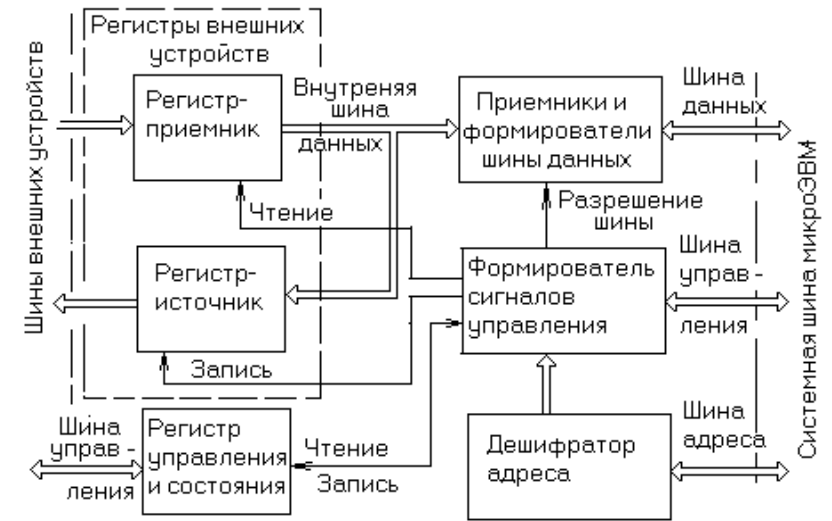


Рис.9.4. Структурная схема типового интерфейса

Структурная схема типового интерфейса представлена на рис.9.4. Регистры данных соединены шиной внешних устройств с соответствующим внешним устройством, являющимся источником или приёмником данных. Эти регистры служат для временного хранения данных и имеют общий адрес. Этот адрес поступает по системной шине адреса от МП в дешифратор адреса, который совместно с формирователем сигналов управления выбирает соответствующий регистр данных. Регистр управления и состояния хранит информацию, поступающую от МП по шине управления к внешнему устройству, или хранит текущее состояние внешнего устройства (например, го-

товность вводимых данных, обнаруженные ошибки и т.д.). При выполнении операции ввода данные принимаются от внешнего устройства и запоминаются в регистре-приемнике. Затем проверяется слово состояния в регистре управления и состояния и после этого осуществляется программный ввод данных в МП. Вывод данных выполняется аналогично, но в обратной последовательности.

9.3. Структура программного обеспечения

Построение ПСУ на базе микропроцессорной техники позволяет использовать принцип программного управления, менять функционирование системы путем изменения программы, обеспечивая логическую гибкость системы, применять микропроцессор (МП) в различных приложениях. Использование программного управления существенно сокращает время разработки системы на основе МП, облегчая задачу логического проектирования, упрощая внесение изменений в ходе разработки системы и при модернизации уже существующих. Изменяется и сам процесс проектирования и построения систем. Написание и отладка программ составляют всё большую часть работ по созданию микропроцессорных систем (МПС).

Структура программного обеспечения (ПО) МПС представлена на рис.9.5.

Прикладное ПО – совокупность программ, разрабатываемых для решения тех прикладных задач (или класса таких задач), для которых проектируется конкретная МПС (на примере класс задач контроля технического состояния и диагностики объекта при разработке МПС технической диагностики).

ПО разработки программ – совокупность программ, используемых в качестве вспомогательных средств на всех этапах разработки программ для системы – от ввода программ на исходном языке до проверки функционирования программ в реальном масштабе времени.

ПО вычислительного процесса – совокупность программ, предназначенных для организации вычислительного процесса в системе и для контроля её функционирования как при реализации прикладных задач, так и при использовании микроЭВМ для разработки математического обеспечения.

Резидентное ПО – совокупность программ, которые могут выполняться данной системой. ПО прикладное и вычислительного процесса, таким образом, является только резидентным ПО.

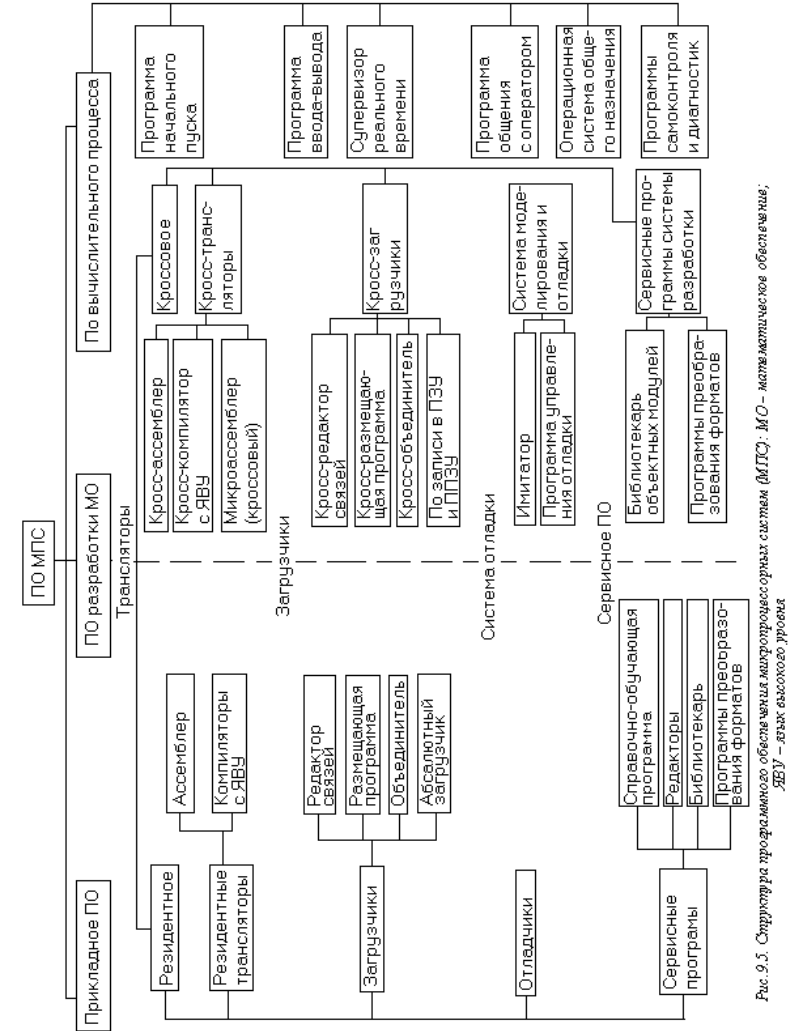


Рис. 9.5 Структура программного обеспечения микропроцессорных систем (МПС). МО – математическое обеспечение; ЯВУ – язык высокого уровня

Кроссовое ПО МПС – предназначенное для работы с МПС и её программами, но реализованное на других, программно несовместимых с ней вычислительных средствах. ПО разработки программ может быть как резидентным, так и кроссовым.

Трудоёмкость программирования и качество ПО в значительной степени определяются используемыми языками программирования: машинным (коды), ассемблером, языками высокого уровня – ЯВУ. В МПС, имеющих микропрограммное управление, используются языки микропрограммирования, соответственно определяются и системы программирования трёх классов: на языках микроассемблера, ассемблера и на ЯВУ.

Важным фактором, оказывающим существенное влияние на сроки разработки и качество ПО, является применение эффективной методики программирования и рациональной организации программ. Единственный язык, непосредственно понимаемый аппаратными средствами МПС – машинный. Программирование на машинном языке, т.е. непосредственное написание кодов команд, представленных в двоичной, восьмиричной или шестнадцатиричной системе, является весьма трудоёмким. Оно применяется в ходе отладки программы для внесения небольших изменений в неё или для проверки небольших частей программы, при настройке программируемых интерфейсов и др. При машинном программировании используются справочные таблицы, содержащие перечень кодов команд МПС совместно с их мнемоническими обозначениями.

В языках ассемблера вместо кодов команд используются их символические буквенные обозначения, что облегчает процесс программирования и чтения программы. Для перевода языка ассемблера в машинные коды применяются программы – трансляторы (ассемблеры). В настоящее время большинство программ для МПС пишутся на языке ассемблера. Ассемблеры, обеспечивая значительное повышение производительности труда программиста в сравнении с программированием в машинных кодах, в то же время сохраняют возможность доступа ко всем аппаратным возможностям программируемого МП. На ассемблере могут быть написаны программы, самые эффективные с точки зрения времени выполнения и объёма занимаемой памяти, оптимальным образом использующие возможности как центрального МП, так и периферийных схем. Несмотря на наличие в языках высокого уровня специальных средств доступа к аппаратным средствам МП, практически все подпрограммы драйверов устройств ввода – вывода пишутся на ассемблере. Современная тенденция в структуре МПС – передача всё большего числа функций по обслуживанию опе-

раций ввода – вывода программируемым периферийным контроллерам, микропроцессорам или однокристальной микроЭВМ. При этом доля программирования операций ввода – вывода на ассемблере возрастает. Центральный МП общается с внешними устройствами через такое программируемое периферийное устройство с помощью высокоуровневых команд. Программы же отработки этих команд в периферийных МП или микроЭВМ пишутся на ассемблере в связи с жёсткими требованиями к времени их выполнения и ограничениями на объём памяти в таких периферийных модулях.

К средствам, облегчающим труд проектировщика МП систем, относятся специальные программные модули, предназначенные для автоматизации трудоёмкого процесса проектирования и отладки программного обеспечения. Эти программные средства делятся на резидентные и кросс-средства математического обеспечения. Резидентные средства обеспечивают взаимодействие разработчика (пользователя) непосредственно с той микроЭВМ, которая лежит в основе проектируемой системы. К ним относятся программы или программные модули:

"загрузчик", который управляет микроЭВМ при считывании программы из устройства ввода в ОЗУ;

"отладчик", предназначенный для обнаружения и устранения ошибок программирования;

"редактор", управляющий микроЭВМ в процессе исправления текста разрабатываемой программы;

"ассемблер", предназначенный для трансляции отлаживаемой (или рабочей) программы, записанной на символическом языке ассемблера, в объектную (машинную) программу, представленную в двоичных кодах команд данной микроЭВМ.

Кросс-средства математического обеспечения, используемого при разработке и отладке программ для МП систем на универсальных ЭВМ, включают в себя:

-компилятор, преобразующий программу, написанную на языке высокого уровня (ФОРТРАН, ПЛ/М и др.), в программу на языке ассемблера или непосредственно в двоичную объектную машинную программу (машинные коды);

-кросс-ассемблер, как и ассемблер, выполняющий трансляцию программы с ассемблера в машинные коды, но в отличие от него, осуществляющий это на универсальной ЭВМ;

-эмулятор, моделирующий функционирование микроЭВМ на универсальной ЭВМ.

9.4. Последовательность отладки алгоритмов и программ для микропроцессорных ПСУ

В микроЭВМ (МПС) производится обработка информации, представленной в числовой двоичной форме. Информацией внутри микроЭВМ (МПС) являются команды и данные, которые обрабатываются по словам, длину которых измеряют в битах (числе разрядов) или в байтах (один байт равен восемь бит). Слова хранятся в ячейках памяти (считается, что одно слово хранится в одной ячейке памяти).

Представление информации в микроЭВМ (МПС) определяется форматом слова, который отображает организацию (назначение) отдельных разрядов в слове. Данные и команды могут быть представлены либо одним словом, либо несколькими. Во втором случае имеются два типа слов: команд и данных, которые распознаются только по их расположению в памяти. Код операции представляет собой закодированное название операции, которую должна выполнить микроЭВМ (МПС). Совокупность кодов операций образует набор команд микроЭВМ (систему команд). Число разрядов, выделенных для кода операции, ограничивает набор команд. Современные микроЭВМ (МПС) выполняют от нескольких десятков до нескольких сотен команд. Код операнда задаёт правило, по которому вычисляется адрес данных, участвующих в операции.

Данные могут храниться в регистрах общего назначения МП, в ячейках памяти, в регистрах устройства ввода-вывода. Данные в микроЭВМ (МПС) могут быть представлены в некотором диапазоне, который определяется длиной слова данных и используемым способом кодирования. Например, в микроЭВМ на базе МПК серии КР580 (аналог PDP-11) для слова данных могут быть выделены 8 или 16 разрядов и один знаковый разряд в регистре состояния. Следовательно, диапазон чисел равен 2^8 или 2^{16} . В микроЭВМ (МПС) для представления чисел используются фиксированная и плавающая запятая.

При использовании чисел с фиксированной запятой (естественная форма) запятая фиксируется в определенном месте числа. Выбор положения запятой во многих задачах представляет значительные трудности. Поэтому предусматривается возможность обрабатывать числа с плавающей запятой. В этом случае для записи числа используется порядок и мантисса. Например, в десятичной системе счисления $0,00005=0,5 \cdot 10^{-4}$, в двоичной системе счисления $0,000101=0,101 \cdot 10^{-3} - 1011 = -0,1011 \cdot 10^4$. Числа с плавающей запятой, используемые в мик-

роЭВМ, нормализуются, т.е. запятая располагается перед первым значащим старшим разрядом числа в двоичной системе. Формат слова данных с плавающей запятой имеет следующий вид (рис.9.6). При записи чисел с плавающей запятой диапазон чисел определяется модулем порядка. Для представления чисел с плавающей запятой обычно используется несколько слов.



Рис.9.6. Формат слова данных с плавающей запятой

Серийные микроЭВМ ограничены базовым списком команд (60 –150), используемым для программирования. В простейшем случае программирование может осуществляться в машинных кодах, т.е. совокупностью двоичных чисел, содержащих информацию о коде операции и операндах. Машинный код – "язык", понятный микроЭВМ (МПС). Составление программы в машинных кодах (двоичных и восьмеричных кодах) – весьма трудоёмкая задача, сопряжённая с большой вероятностью появления ошибок. Поэтому широко применяется программирование на языке ассемблера – языке символического программирования. В нём каждому машинному слову поставлено в соответствие понятное человеку мнемоническое обозначение в форме аббревиатуры от английских или русских слов, определяющих смысл команд. Например, мнемоника ASR означает Arithmetic Shift Right (арифметический сдвиг вправо). Важным преимуществом программ, написанных на этом языке, является возможность обеспечить максимальную производительность микроЭВМ при минимальной ёмкости памяти.

Команды программ, написанные на языке ассемблер, перед загрузкой в память микроЭВМ (МПС) должны быть преобразованы в команды в машинных кодах. Этот процесс (трансляция или ассемблирование) осуществляется с помощью специальной программы – ассемблера.

Команда, написанная на языке ассемблера, может быть условно разделена на четыре части, каждая из которых записывается в своем поле:

	Поле метки	Поле операции	Поле операнда	Поле комментария
Части команды	Метка	Операция	Операнд	Комментарий

При этом мнемонику операции отделяют от операнда пробелом, между операндом и комментарием ставят точку с запятой, а после метки ставят двоеточие или пробел. Метка задает адреса переходов к командам. Поле комментария служит для пояснения назначения команды, для удобства чтения программы и при трансляции игнорируется.

Программа, написанная на ассемблере (исходная программа или исходный модуль), транслируется в объектную, которая затем корректируется и тестируется, после чего получается рабочая программа. Чтобы пользователь смог разработать рабочую программу, серийная микроЭВМ снабжается набором готовых программ, которые образуют системное программное обеспечение. Оно делится на резидентное и кросс-программное. Первое реализуется в той же микроЭВМ, которая будет использоваться при обработке информации. Кросс-программное обеспечение позволяет создать прикладные программы на ЭВМ другого типа.

Системное программное обеспечение по своему составу может быть различным. Например, системное программное обеспечение (операционная система) микроЭВМ семейства МПК-80 (PDP-11) содержит программы "монитор" (абсолютный загрузчик), "редактор текста", "ассемблер", "отладчик" и др. Программа "монитор" служит для управления работой микроЭВМ (МПС) в процессе трансляции, тестирования, корректировки и ввода прикладных программ пользователя. Она хранится в ПЗУ. На рис.9.7,а показан принцип работы программы. С включением питания осуществляется пуск, после чего в счётчике команд устанавливается адрес первой команды "монитора", программа переводится в режим ожидания, в котором она находится до тех пор, пока пользователь нажатием соответствующей клавиши на терминале не запросит выполнение одной из подпрограмм "монитора". После выполнения вызванной подпрограммы "монитор" возвращается в режим ожидания.

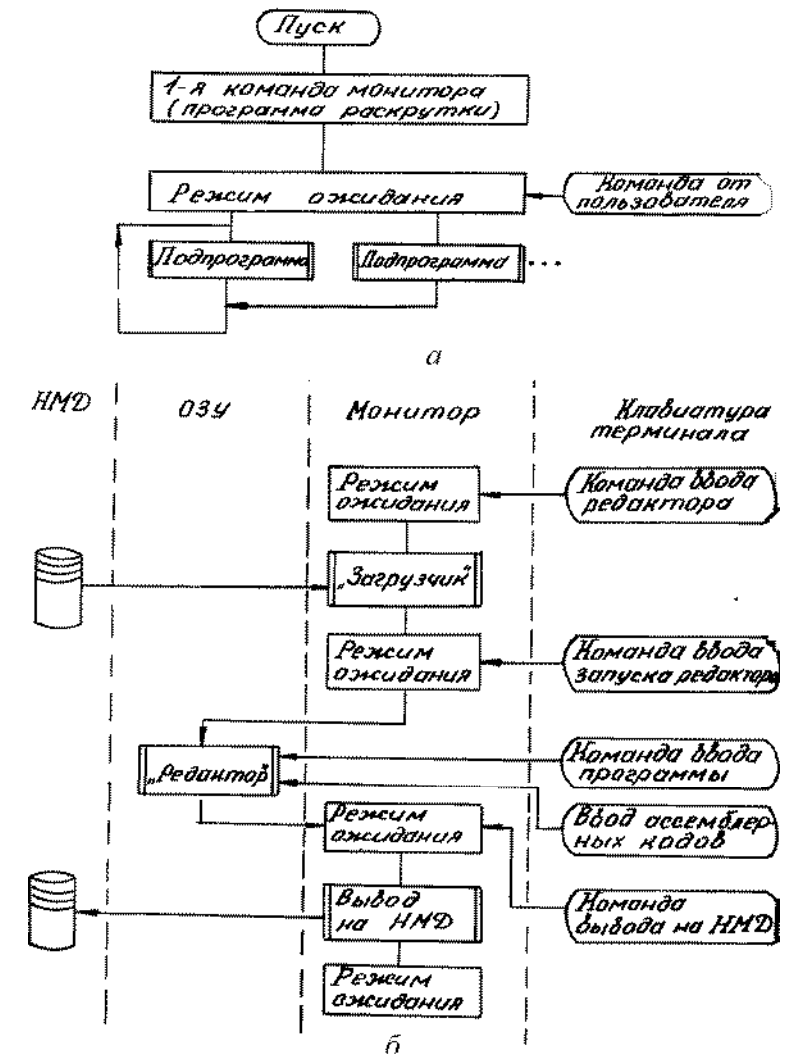


Рис.9.7. Принцип работы программ: а - "монитор"; б - "редактор"

Среди подпрограмм "монитора" имеется подпрограмма "загрузчик", осуществляющая ввод данных с некоторого носителя данных (например, с накопителя на магнитных дисках), она включает в работу устройство ввода, обеспечивая ввод программы, хранящейся на внешнем носителе, и размещение ее в памяти микроЭВМ. Также имеется подпрограмма вывода на внешний носитель информации (например, на магнитный диск). Чтобы избежать ошибок при передаче исходной программы, написанной на языке ассемблера, для записи её на магнитный диск используется программа "редактор текста" (рис.9.7,б). После подачи оператором команды ввода "редактора" "монитор" выходит из режима ожидания и вызывает соответствующую подпрограмму "загрузчик". С внешнего носителя информации (например, с магнитного диска или магнитной ленты) считывается и вводится в память микроЭВМ программа "редактор". "Монитор" возвращается в режим ожидания. Оператор подаёт с терминала команду запуска "редактора". При этом "монитор" передает управление находящейся в оперативной памяти программе "редактор". С этого момента может начаться ввод ассемблерных команд. Каждый набранный на терминале символ высвечивается на экране дисплея и засылается в память. После введения нескольких команд программы оператор может проверить правильность введенных символов и если он обнаружит ошибку, то может ввести соответствующую команду (строку) снова. Когда вся программа после её проверки оказалась введенной в память микроЭВМ "редактор" с помощью программы "монитор" может вызвать подпрограмму вывода данных на внешний носитель, которая осуществляет вывод прикладной (исходной) программы из ОЗУ микроЭВМ на внешний носитель. После этого "монитор" переходит в режим ожидания.

Программа "ассемблер" преобразует исходную программу на языке ассемблера в объективную. Она позволяет также выявить синтаксические (не смысловые, связанные с несоблюдением правил записи команд) ошибки в тексте исходной программы. Например, могут обнаруживаться ошибки, связанные с повторным использованием метки, отсутствием в команде указания об операнде и т.п. При первом просмотре исходной программы "ассемблер" формирует список синтаксических ошибок. Если обнаружена ошибка, она исправляется с помощью "редактора", после чего процесс ассемблирования продолжается. Процесс получения объективной программы (рис.9.8,а) заключается в следующем. Оператор подаёт команду ввода "ассемблера".

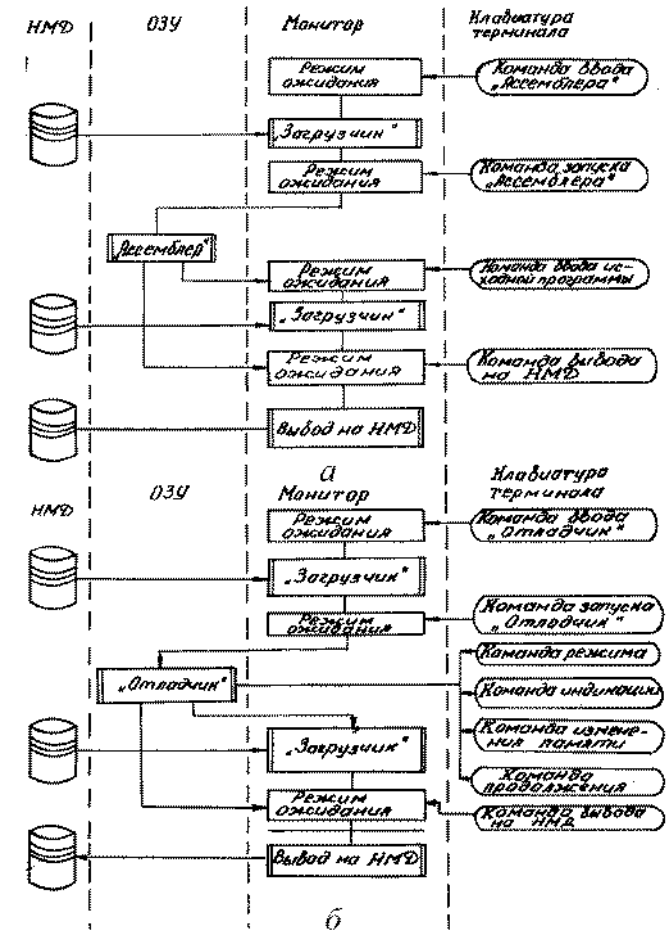


Рис.9.8 Процесс получения объективной программы (а) и принцип работы программы "отладчик" (б)

"Монитор" выходит из состояния ожидания и передаёт управление подпрограмме "загрузчик", которая, управляя работой устройства ввода, вводит "ассемблер" с внешнего носителя в ОЗУ микроЭВМ. По окончании этой операции "монитор" возвращается в режим ожидания. Затем оператором может быть подана команда запуска "ассемблера". "Ассемблер" вызывает "загрузчик", с помощью кото-

рого производится ввод исходной программы с внешнего носителя в ОЗУ микроЭВМ.

После этого начинается процесс трансляции. Если при этом не обнаруживаются ошибки, то "ассемблер" вызывает подпрограмму вывода, которая управляет процессом выдачи объектной программы в этом случае на внешний носитель. Программа "ассемблер" может располагаться в ПЗУ, в этом случае этап ввода её в память исключается.

С помощью "редактора" и "ассемблера" получают объектную программу, не содержащую синтаксических ошибок. Однако в ней могут быть смысловые (семантические) ошибки (например, использование команд, выполняющих не те действия, которые должны быть при решении задачи; неверное использование меток; смысловые ошибки в схеме алгоритма и т.д.). В этом случае объектная программа, введённая и выполненная в микроЭВМ, не дала бы правильных результатов. Необходимо протестировать программу. Это выполняется с помощью служебной программы "отладчик", которая обеспечивает:

- индикацию содержимого ячеек памяти; введя с клавиатуры адрес памяти, можно вызвать содержимое ячейки на экран дисплея или на печать;

- изменение содержимого ячейки памяти с клавиатуры терминала; оператор вводит адрес ячейки и новое содержимое, которое должно быть помещено в неё;

- индикацию содержимого регистров центрального процессора (регистров общего назначения, счётчика команд, аккумулятора, регистра адреса, указателя стека, регистра признаков) на экране дисплея;

- останов по адресу; если указан один или несколько адресов (точек останова), то выполнение объектной программы будет прерываться при достижении соответствующих команд, находящихся в ячейках памяти с указанными адресами. После останова можно, проверяя содержимое памяти и регистров, установить правильность работы выполненной части программы. Если выявлены ошибки, то их можно исправить, изменяя содержимое памяти. После этого программист подаёт команду на продолжение выполнения программы;

- пошаговый режим, в котором происходит останов после каждой выполненной программы, или *n*-тактный режим с остановом после *n* команд. После выполнения заданного числа команд "отладчик" переходит в режим ожидания команд: "продолжить", "индицировать содержимое памяти" или "индицировать содержимое регистров".

Последовательность действий при работе с "отладчиком" показана на рис.9.8,б. Команда ввода "отладчика" выводит "монитор" из

режима ожидания, вызывается "загрузчик", производится чтение "отладчика" с внешнего носителя и ввод в ОЗУ. По команде запуска "отладчика" последний передает управление "загрузчику", который считывает с внешнего носителя объектную программу и вводит её в ОЗУ микроЭВМ. Далее программист-оператор с клавиатуры может задать или значение *n*, или совокупность адресов (точек останова), в которых будет останавливаться выполнение программы. Затем он выдает команду продолжения и в зависимости от введённого значения *n* выполняется одна или несколько команд, после этого "отладчик" возвращается в состояние ожидания. При желании оператор может посмотреть содержимое ячеек памяти или регистров и произвести изменение их содержимого. Затем по команде продолжения обеспечивается выполнение следующей группы команд. После отладки программы "отладчик" передаёт управление подпрограмме вывода, которая выводит окончательный вариант объектной программы (рабочую программу) на внешний носитель.

С помощью программ системного ПО ("ассемблера", "редактора", "монитора" и "отладчика") исходная программа превращается в скорректированную объектную (рабочую) программу. При конструировании МПУ на одном и том же оборудовании (системе разработки) можно имитировать различные МПУ с помощью служебной программы "имитатор", которая осуществляет имитацию характеристик конкретного типа микропроцессора, т.е. преобразовывает систему команд этого МП в систему команд конкретной САК или САУ; имитацию периферийных устройств МПУ, для которого создаётся рабочая программа; отладку объектной программы на микроЭВМ с элементной базой и языком кодовых комбинаций, отличными от элементной базы и языка кодовых комбинаций МПУ, для которого разрабатывается программа.

Процесс разработки прикладного программного обеспечения включает разработку схемы алгоритма; написание текста программы; трансляцию (компиляцию) программы в коды МП; отладку программного обеспечения.

Алгоритм работы микроЭВМ, реализующий прикладную задачу, обычно представляется тремя схемами: структурной, функциональной и машинно-ориентированной. Структурная схема является укрупнённой схемой алгоритма и указывает на последовательность функций, которые должны выполняться с помощью программного обеспечения, она достаточно проста, содержит малое число переходов и определяет состав основных блоков программного обеспечения

(рис.9.9). Функциональная схема содержит подробную схему алгоритма работы основных блоков, поясняет принцип их функционирования с указанием конкретных операций (рис.9.10) и содержит примерно в 20 раз больше блоков, чем структурная. Машинно-ориентированная схема алгоритма является дальнейшей детализацией алгоритма, отражает систему команд конкретных микропроцессорных средств, содержит примерно в три раза больше блоков, чем функциональная схема, и используется для написания программ как на ассемблере, так и на языках высокого уровня. Каждый блок этой схемы соответствует не более чем трём командам (рис.9.11).

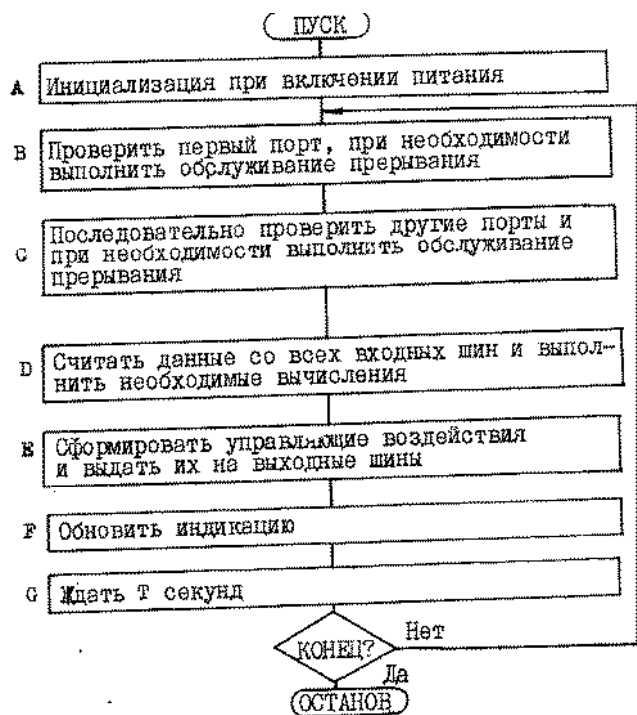


Рис.9.9. Структурная схема программного обеспечения вычислительного комплекса

Разработка прикладных программ – одна из наиболее трудоёмких и ответственных операций при проектировании систем с микро-

ЭВМ. Её стоимость составляет 50-90% всей стоимости проектирования САК или САУ.

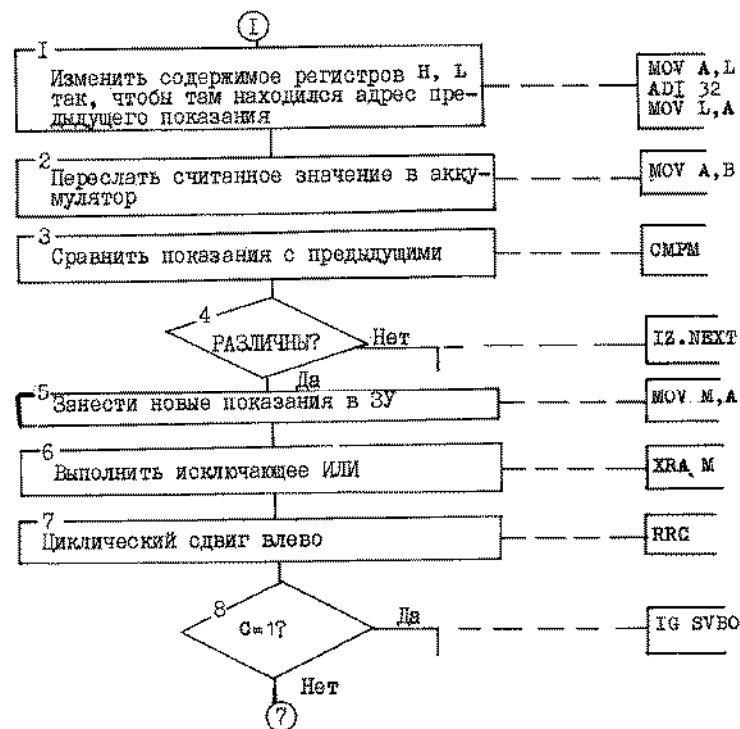


Рис.9.10. Функциональная схема (блок – схема) алгоритма работы основных блоков вычислительного комплекса

Тема 10. Пример расчёта ПСУ на микропроцессорной технике

10.1. Исходные данные

Рассмотрим информационное обеспечение САК технического состояния двигателя внутреннего сгорания и машинно-тракторного агрегата в целом (измерительной экспертной системы - ИЭС), реализующей оперативный динамический метод тестовых испытаний. Источником информации ИЭС в данном случае выступает двигатель, трактор или машинно-тракторный агрегат в целом. Целью информирования является определение технического состояния элементов, узлов, агрегатов и систем двигателя, трактора и МТА в целом. Пользователем информации в этом случае выступает диагност. Поток информации от её источника характеризуется следующими показателями. При применении в ИЭС типовых датчиков (первичных измерительных преобразователей) вид поступающей информации – аналоговый, хотя могут быть применены и датчики, выдающие информацию непосредственно в дискретном виде. Виды контролируемых параметров (физических величин), диапазоны их изменения, условия отображения, скорость генерации, амплитудно-частотный спектр и др. приведены в табл. 10.1.

Значение F_C определяется верхней частотой неравномерности вращения коленчатого вала, τ_C – длительностью переходного процесса выбег-разгон. Значение Q_C при съеме сигнала с зубчатого венца маховика двигателя определяется наложением на полезный сигнал зубцовой частоты помехового сигнала от эксцентricности маховика и неуравновешенности двигателя в целом, а при съеме сигналов с пьезоэлектрического вибрационного датчика – акселерометра, с целью применения его для привязки по углу поворота, значение Q_C определяется влиянием сигналов впрыскивания топлива от других форсунок. Входные величины ИЭС при динамическом методе являются преимущественно временными (зависимости $\omega(t)$, $\varepsilon(t)$), пространственными (зависимости $\varepsilon(\varphi)$) или пространственно-временными (например, зависимость $\varepsilon(t, \varphi)$), а также преимущественно активными. Они могут быть как непрерывными, так и дискретными (например, при применении фотоэлектрических датчиков угла). Помехи могут быть независимыми, а также связанными с входными величинами (например, при измерении среднего значения углового ускорения коленчатого вала двигателя в переходных режимах внутрицикловая неравномерность вращения будет помехой).

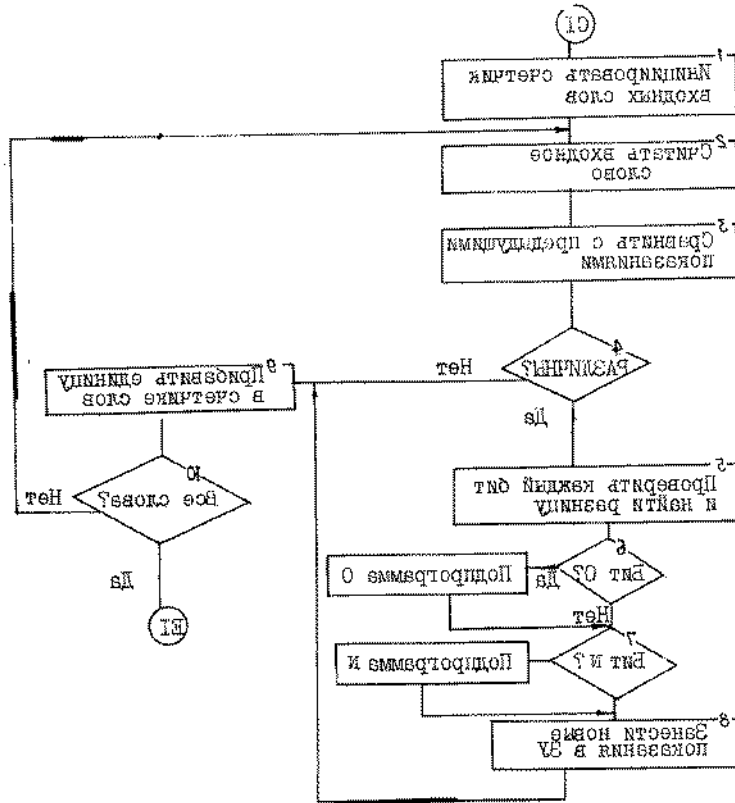


Рис.9.11. Машинно – ориентированная схема алгоритма работы вычислительного комплекса

Таблица 10.1

Параметры входных сигналов

Точка съёма сигнала	Вид сигнала	Диапазон амплитуд сигнала A , В	Диапазон частот сигнала $F_{\text{с}}$, Гц	Отношение сигнал/шум	Максимальное время анализа сигнала $t_{\text{с}}$, с	Объём сигнала (максимальный) $V_{\text{с}}$
1	2	3	4	5	6	7
Зубчатый венец (сигнал угла) маховика	Синусоидальный	0,1-3,0	300-6000	10	3-5	$0,3 \cdot 10^6$
Фотоэлектрический преобразователь угла	Дискретный	4,0	300-60000	10	3-5	$3,0 \cdot 10^6$
Ротор ТКР (частота вращения)	Синусоидальный	0,1-1,0	1200-12000	10	10	$0,12 \cdot 10^6$
Отверстие на маховике для ВМТ	Импульсный	0,1-1,0	$F_{\text{с}} \approx 1000$ $F_{\text{д}} = 3,0-40,0$	10	3-5	$2 \cdot 10^3$
ТВД топливной системы (виброускорение)	Импульсная последовательность	0,02-0,15	$F_{\text{с}} \approx 1000$ $F_{\text{д}} = 20-40,0^*$ $f_{\text{д}} = 3000-7000$ 0-5	1,2-2**	0,001-0,01	20
ТКР (давление наддува)	Медленно – меняющийся			10	10	500
Система охлаждения (температура воды)	Постоянный		0-1	10	10	100
Система смазки (температура масла)	Постоянный		0-1	10	10	100

* За сигнал принят виброускорение вращающегося вала, на котором установлен датчик виброускорения.

$F_{\text{д}}$ – частота следования этого импульса, $f_{\text{д}}$ – частота заполнения виброимпульсов (несущая) в стационарном режиме минимальной частоты холостого хода. Импульсы стреловидные и другие цилиндры.

лавляются пометками.

** Указанное отношение сигнал/шум справедливо для режима минимальной частоты вращения холостого хода.

Таблица 10.2

Параметры входной информации, поступающей в микроЭВМ.

Физический процесс (сигнал)	Разрядность	Диапазон		Разрядность полезная $r_{\text{п}}$	Скорость генерирования $V_{\text{д}}$ в бит/с	Погрешность дискретизации δ , %
		$\lambda_{\text{дв}}$	$\lambda_{\text{жж}}$			
1	2	3	4	5	6	7
Угловая скорость коленчатого вала, рад/с	10	8 л	80 л	8	$1,2 \cdot 10^5$	0,5
Угловое ускорение коленчатого вала, рад/с ²	10	0	± 500	8	$0,5 \cdot 10^3$	1
Угловая скорость ротора ТКР, рад/с	10	330 л	2000 л	8	$24 \cdot 10^3$	1
Давление наддува, Мпа	10	0	0,1	8	10	3
Временной интервал (при съёме с маховика), мс	16	0,10	3,0	16	$12 \cdot 10^3$	2
Временной интервал (при съёме с ФЭП), мс	16	0,01	3,0	16	$120 \cdot 10^3$	2
Угол поворота, град	16	3	30000	16	$12 \cdot 10^3$	2
Температура воздуха, воды, масла, $^{\circ}\text{C}$	10	40	100	8	2	2
Виброускорение, м/с ²	10	5,0	500,0	8	$40 \cdot 10^3$	10

Непрерывный сигнал, снимаемый с датчика зубьев маховика, имеет спектр, ограниченный высшей частотой $F_B=6K\text{ц}$, т.е. $v_H=2F_B=1200I/c$ (табл.10.2).

Пропускная способность канала передачи информации с этого датчика с погрешностью $\delta=0,1\%$ должна быть

$$C \geq R_{\text{нлх}} = F_B \log_2 \left(1 + \frac{1}{\delta^2}\right) = 120 \cdot 10^3 \text{ бит/с.}$$

Аналогично при том же значении δ для сигнала с фотоэлектрического преобразователя (ФЭП), устанавливаемого на валу ДВС ($F_B=60K\text{ц}$) – $C \geq 1,2 \cdot 10^6 \text{ бит/с}$; для сигнала частоты с ротора турбокомпрессора (ТКР) – $C \geq 60 \cdot 10^3 \text{ бит/с}$; для сигнала с отверстия верхней мёртвой точки (ВМТ) – $C \geq 20 \cdot 10^3 \text{ бит/с}$; для сигнала виброимпульса впрыска – $C \geq 20 \cdot 10^3 \text{ бит/с}$; для сигнала давления с ТКР – $C \geq 30 \text{ бит/с}$; для сигнала системы охлаждения – $C \geq 6 \text{ бит/с}$; для сигнала системы смазки – $C \geq 6 \text{ бит/с}$.

Так как для обработки сигналов в микроЭВМ (МПС) используется двоичное или блочное кодирование, то аналоговые сигналы с датчиков необходимо преобразовать с помощью аналого- и время-цифровых преобразователей в код. При блочном кодировании амплитуд с достаточной точностью используется $m=9-10$ разрядов, а при кодировании временных интервалов для сигналов, снимаемых с двигателя, за исключением сигнала с фотоэлектрического датчика, достаточно выбрать частоту квантования $f_0=100k\text{Гц}$ (длительность двоичного символа $\tau_0=1/f_0=10\text{мкс}$), а во втором $f_0=10M\text{Гц}$ ($\tau_0=0,1\text{мкс}$). Тогда имеем в том и другом случае $\tau_{ca}=m\tau_0=100\text{мкс}$; $\tau_{CB}=1,6\text{мкс}$; общее число двоичных сигналов $M_a=2^m=1024$; $M_B=65536$; требуемая полоса пропускания канала извлечения информации $\Delta f_a=M_a/\tau_{ca} \approx 5-10M\text{Гц}$; $\Delta f_B=M_B/\tau_{CB}=16000M\text{Гц}$. Обработка сигнала блочным кодированием в последнем случае практически невозможна. В то же время при двоичном кодировании $\Delta f_a=1/\tau_0=50-100k\text{Гц}$; $\Delta f_B=5-10M\text{Гц}$, что вполне реально. Задержка в обработке двоичного сигнала при кодировании и декодировании равна $\tau_{za}=2\tau_0=20\text{мкс}$; $\tau_{zb}=0,2\text{мкс}$.

10.2. Расчёт показателей МПС

В соответствии с методикой (глава 8) определим требуемые параметры (в скобках даны параметры для передвижной системы на базе микроЭВМ БК – 0010): $K_{\text{ми}}=3$ (3); $K_{\text{ки}}=2$ (2); $K_{\text{тп}}=2$ (2); $K_{\text{до}}=1,6$

(1); $K_{\text{сви}}=K_{\text{свыи}}=0,6$ (0,6); $K_{\text{вви}}=0,9$ (1); $K_{\text{выи}}=0,9$ (0,9); $T_{\text{зд}}=300c$ (180c); $N_{\text{но}}=80$ (100).

Для извлечения информации также и о внутрицикловой неравномерности работы ДВС необходимо использовать максимально возможное число угловых меток. При съёме сигнала с маховика за время разгона – выбега двигателя (максимальное число зубьев $z_{\text{зmax}}=144$, число периодов не более 100) число снимаемых отсчётов (значений процесса, взятых дискретно с некоторым периодом) не более 15000, а при съёме сигнала с фотоэлектрического преобразователя (число угловых меток $z_{\text{з}} \approx 1000$) число снимаемых отсчётов примерно 100000. Следовательно, при измерении временных интервалов между зубьями (при применении 16-разрядного время – кодового преобразователя) объём вводимой информации $\Omega_{BB}=10\text{кбит}$, при съёме с фотоэлектрического датчика $\Omega_{BB}=1,6\text{Мбит}$. При применении преобразователя напряжение–код необходимо поочередно измерять угловую скорость и ускорение. В этом случае при применении 10-разрядного АЦП объём $\Omega_{BB}=300\text{кбит}$. Объём вводимых данных с ПЗУ значительно ниже (около 30 Кбайт).

Требуемая скорость обработки входной информации составляет: $v_{\text{ввн}}=6000 \text{ измерений/с}$ (12000 измерений/с) или при 16-разрядных (10-разрядных) числах $v_{\text{ввн}}=0,1 \text{ Мбит/с}$ (0,12 Мбит/с).

Скорость ввода данных с ПЗУ: с накопителя на магнитных дисках составляет $v_{\text{ввн}}=0,05 \text{ Мбит/с}$; с кассетного магнитофона - $v_{\text{ввн}}=1200 \text{ бит/с}$; быстрое действие программного ввода $v_{\text{ввн}}=20 \text{ кбайт/с}$; (для БК-0010 – быстрое действие канала прямого доступа в память $v_{\text{ввн}}=150 \text{ кбайт/с}$ ($v_{\text{с}}=300 \text{ кбайт/с}$)).

Ввод данных осуществляется с устройства сопряжения с объектом и с ПЗУ (рабочие программы, программы прерывания, стандартные программы, константы), т.е. $n_{ij}=2(2)$. При работе ИЭС в режиме с разделением времени устройства ввода данных в микроЭВМ работают поочередно, т.е. $N_{\text{вви}}=1$. Для расчёта динамической скоростной характеристики ДВС (зависимости динамического крутящего момента или мощности от частоты вращения) необходимо ориентировочно выполнить следующее число операций: ввод с входного порта с учётом объёма $\Omega_{\text{вв}} - N_{\text{нон}} \approx 30000$ (≈ 30000); ввод с накопителя $N_{\text{нон}} \approx 5$ (5); сложение- вычитание $N_{\text{нос}} \approx 300000$ (300000), умножения $N_{\text{ноу}} \approx 60000$ (60000). Общее число операций $N_{\text{но}\Sigma} \approx 400000$ (400000). Принимаем $K_{\text{но}}=1$ (1). Длительность операций: сложения с фиксированной запятой $t_{\text{кф}\Sigma}=6 \text{ мкс}$ (1,6 мкс), сложения с плаваю-

щей запятой $t_{кпу} = 218 \text{ мкс}$ (-), умножения с фиксированной запятой $t_{кпу} = 112 \text{ мкс}$ ($\approx 70 \text{ мкс}$); умножения с плавающей запятой $t_{кпу} = 360 \text{ мкс}$ (-). Частота появления операций: сложения $P_{\Sigma} = 75\%$; умножения $P_{\text{ку}} = 15\%$. Вывод данных может осуществляться на графический дисплей и на цифropечатающее устройство (принтер), т. е. $n_{ij}^* = 2(2)$. Объём выводимых данных составляет $\Omega_{\text{выв}} \approx 5000$ (5000). Скорость вывода на графический дисплей $v_{\text{выв}} = 20 \text{ кбайт/с}$ (20 кбайт/с), на печать $v_{\text{выв}} = 8 \text{ знаков/с}$ (8 знаков/с). Принимаем $N_{\text{выв}} = 1$ (1); $\kappa_{\Gamma} = 0,9$ (0,9); $\kappa_{\text{ки}} = 1$ (1); стоимость ИВК $z_{\text{ИВМ}}^1 \approx 12000 \text{ р.}$, на базе БК-0010 (с учётом магнитофона и телевизионного монитора) $z_{\text{ИВМ}}^1 \approx 1000 \text{ р.}$, $z_{\text{ЗН}}^1 \approx 3000 \text{ р.}$ (3000р.); $\kappa_{\text{лси}} = 1$ (1); $\kappa_{\text{соц}} = 0,05$; $\kappa_{\text{рени}} = 0,12$; $\kappa_{\text{прки}} = 0,1$; $\kappa_{\text{Н}} = 1,6$; $\kappa_{\text{пр.ки}} = 0,3$.

10.3. Расчет показателей ИВК, входящих в ИЭС

Для оценки требуемого быстродействия и объёма вычислений определим расчётные показатели (см. главу 8).

1. Время ввода информации при съёме сигнала непосредственно с маховика двигателя:

$$T_{\text{ВВ}} = \sum_{j=1}^{n_{ij}} \Omega_{\text{ВВ}j} / v_{\text{ВВ}j} / K_{\text{ВВ}ij} N_{\text{ВВ}ji} = \left(\frac{105}{150} + \frac{30}{50} \right) = 1,3 \text{ с.}$$

для ИЭС на базе БК-0010 $T_{\text{ВВ}} = (105/200 + 30/100) = 0,825 \text{ с.}$

2. Среднее быстродействие ИЭС:

- на базе ИВМ при применении операций с фиксированной запятой

$$v_{\text{эвмф}} = 1 / (0,75 \cdot 6 \cdot 10^{-6} + 0,15 \cdot 112 \cdot 10^{-6}) = 46 \cdot 10^3 \text{ операций/с;}$$

- при применении операций с плавающей запятой

$$v_{\text{эвмп}} = 1 / (0,75 \cdot 218 \cdot 10^{-6} + 0,15 \cdot 360 \cdot 10^{-6}) = 4,6 \cdot 10^3 \text{ операций/с;}$$

- на базе БК-0010

$$v_{\text{эвм}} = 1 / (0,75 \cdot 6 \cdot 10^{-6} + 0,15 \cdot 70 \cdot 10^{-6}) = 90 \cdot 10^3 \text{ операций/с;}$$

3. Время выполнения первичной обработки.

Так как требуемое быстродействие ниже чем у серийных микроЭВМ, то целесообразно принять значение $v_{\text{эвм}}$, равным быстродействию последних. Тогда имеем:

- для ИЭС на базе ИВМ при съёме сигнала с маховика

$$T_{\text{но}} = N_{\text{но}\Sigma} \kappa_{\text{но}} / v_{\text{эвм}} = 4 \cdot 10^3 / 2 \cdot 10^3 = 2,0 \text{ с;}$$

- для ИЭС на базе БК-0010

$$T_{\text{но}} = 4 \cdot 10^3 / 3 \cdot 10^3 = 1,3 \text{ с.}$$

4. Время вычисления и формирования выходных данных для ИЭС на базе ИВМ:

$$T_{\text{пр}} = \Omega_{\text{выв}} K_{\text{пр}} N_{\text{пр}} / K_{\text{бд}} v_{\text{эвм}} = 5000 \cdot 100 \cdot 1,5 / 2 \cdot 200000 = 1,9 \text{ с;}$$

- на базе БК-0010

$$T_{\text{пр}} = 5000 \cdot 100 \cdot 1,5 / 2 \cdot 300000 = 1,25 \text{ с.}$$

5. Время работы устройств вывода данных на графический дисплей:

- для ИЭС на базе ИВМ

$$T_{\text{выв}} = \Omega_{\text{выв}} / v_{\text{выв}} \kappa_{\text{выв}} N_{\text{выв}} = 5000 \cdot 16 / 20 \cdot 10^3 \cdot 0,9 \cdot 1 = 4 \text{ с;}$$

- на базе БК-0010

$$T_{\text{выв}} = 5000 \cdot 16 / 20 \cdot 10^3 \cdot 0,9 \cdot 1 = 4 \text{ с.}$$

Время вывода на печать

$$T_{\text{выв}} = 5000 / 8 \cdot 0,9 \cdot 1 = 625 \text{ с.}$$

6. Среднее время решения задачи построения и вывода на графический дисплей динамической скоростной характеристики с помощью ИЭС на базе ИВМ

$$T_{\text{эвм}} = [T_{\text{ВВ}}(1 - \kappa_{\text{свв}}) + T_{\text{но}} + T_{\text{пр}} + T_{\text{выв}}(1 - \kappa_{\text{свв}})] / \kappa_{\Sigma} = 1,3(1 - 0,6) + 2 + 1,9 + 4(1 - 0,6) / 0,9 = 6,7 \text{ с;}$$

- на базе БК-0010

$$T_{\text{эвм}} = [0,825(1 - 0,6) + 1,3 + 1,25 + 4(1 - 0,6)] / 0,9 = 5 \text{ с.}$$

Среднее время решения указанной задачи при выводе графиков на печатающее устройство $T_{\text{эвм}} \approx T_{\text{выв}} = 10 \text{ мин.}$

Расчитанное время является ориентировочным и в реальном устройстве может возрастать в несколько раз.

7. При оценке объёма памяти ОЗУ для систем на базе серийных микроЭВМ достаточно определить объём ОЗУ пользователя, который для 16-разрядных входных и выходных величин равен

$$N_{\text{озул}} = 1,4(2a + b) = 1,4(2 \cdot 30000 + 5000) = 86 \text{ 16-разрядных чисел или 172Кбайт.}$$

8. Определение требуемой длины разрядной сетки при обработке аналоговых сигналов.

Определение длины разрядной сетки можно осуществить исходя из точности измерения входных данных. При применении стандартных АЦП добиваются, чтобы входной сигнал x изменялся от θ до x_m . Если x_0 необходимо измерить с погрешностью Δx_0 , то масштаб единицы младшего разряда равен $h \approx x_m / 2^n$. При этом погрешность представления непрерывной величины x в дискретном виде будет $0 \leq \Delta x_1 \leq h$. Известно, что погрешность Δx_1 является равномерно распределённой случайной величиной:

$$f(\Delta x_1) = \begin{cases} 1/h, & \text{при } 0 \leq \Delta x_1 \leq h; \\ 0, & \text{при } h \leq \Delta x_1, \Delta x_1 \leq 0. \end{cases}$$

Для выбора h необходимо, чтобы средняя квадратическая погрешность дискретизация $\sigma_{\Delta x_1}$ была бы меньше требуемой средней квадратической аппаратной погрешности измерения x_0 , т.е. $\sigma_{\Delta x_1} < \sigma_{\Delta x_0}$ или $\sigma_{\Delta x_1} = k\sigma_{\Delta x_0}$, где $0 < k < 1$.

Так как для равномерно распределённой случайной величины $\sigma_{\Delta x_1} = h/(2\sqrt{3})$, то $x_{om}/(2 \cdot 2^n \sqrt{3}) = k\sigma_{\Delta x_0}$, откуда

$$R = \text{ent} \left\{ (\ln x_{om} - \ln \sigma_{\Delta x_0} - \ln 2 - 0,51n_3 - \ln k) / \ln 2 \right\},$$

где ent – целая часть числа.

При оценке точности измерений можно принять $k=1/3$, тогда

$$R = \text{ent} \left\{ 1,44(\ln x_{om} - \ln \sigma_{\Delta x_0}) - 0,21 \right\}.$$

Например, при $\delta_{x_0}=0,1\%$ получим $R=9$.

9. Определение длины разрядной сетки при измерении ускорения цифровыми устройствами, когда используется алгоритм скользящего усреднения сигналов скорости и ускорения, при котором в течение всего переходного процесса суммируется $2z_3$ (или $4z_3$) отсчётов с последующим добавлением $(2z_3+1)$ -го отсчёта, или $(4z_3+1)$ -го, и вычитанием первого отсчёта, то погрешность измерения частоты вращения и углового ускорения будет определяться погрешностью измерения временного интервала $T_3=N/f_0$ между соседними угловыми метками (периодами зубцовой частоты):

$$\delta_{T_3} = \Delta T_3 / T_3 \approx \delta N \approx 1/N.$$

Для минимального периода тракторных двигателей ($n_{max}=2400 \text{ об/мин}$) $T_{3min}=60/(n_{max}z_3)$ и задании погрешности $\delta_{T_3}=0,5\%$, т.е. $N_{min}=200$ импульсов, требуемая частота заполнения $f_0 \geq N/T_{3min} = n_{max} z_3 N/60$. Например, при $z_3=144$ должно быть $f_0 \geq 1,2 \text{ МГц}$. В этом случае для минимальной частоты вращения, при которой измеряется ускорение, максимальное число импульсов должно быть $N_{max}=T_{3max}f_0=60f_0/n_{min}z_3$, при $n_{min}=200 \text{ об/мин}$ имеем $N_{max}=60 \cdot 1,2 \cdot 10^6 / 200 \cdot 144 = 2500$ или разрядность $R=11$. При задании меньшей погрешности, например $\delta_{T_3}=0,1\%$, имеем $N_{min}=1000$ импульсов, $f_0 \geq 5,8 \text{ МГц}$, $N_{max}=12083$, $R=14$.

В микропроцессорном исполнении системы целесообразно выбирать разрядность, кратную восьми. В данном случае необходимо выбирать $R=16$.

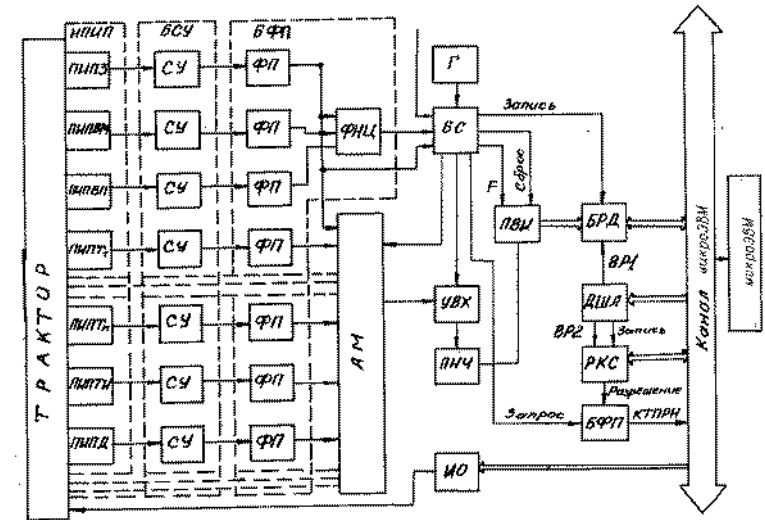


Рис. 10.1. Структурная схема устройства сопряжения микроЭВМ IBM-PC с двигателем: НИПП – набор первичных измерительных преобразователей (ПИП); ПИПЗ – ПИП зубьев; ПИПВМ – ПИП верхней мертвой точки; ПИПВП – ПИП впрыска; ПИПТ₁ ... ПИПТ_n – ПИП температуры; ПИПТИ – ПИП тепловых излучений; ПИПД – ПИП давления; БСУ – блок согласующих усилителей (СУ); БФП – блок функциональных преобразователей (ФП); ФНЦ – формирователь импульса начала цикла (НЦ); АМ – аналоговый мультиплексор; Г – генератор импульсов заполнения; ВС – блок синхронизации; УВХ – устройство выборки и хранения; ПНЧ – преобразователь напряжение-частота; ИО – исполнительный орган; ПВИ – преобразователь временных интервалов в код; БРД – блок регистров данных; ДША – дешифратор адреса; РКС – регистр команд и состояния; ФПР – формирователь сигнала прерывания; z₃ – последовательность импульсов, следующих с частотой прохождения зубьев; НЦ – импульс начала цикла; УМ – сигнал управления мультиплексором; УВ – сигнал управления УВХ; F – последовательность (пачка) импульсов, следующих с частотой генератора Г в интервале между соседними импульсами z₃; ВР1 – сигнал разрешения блоку БРД; ВР2 – сигнал разрешения блоку РКС; КТПРН – сигнал готовности УСО к прерыванию программы.

Дополнительная:

1. Вершинин Д.Е. Применение микропроцессоров для автоматизации технологических процессов. Л., ЭАИ, 1986. 208 с.
2. Микропроцессоры, микроЭВМ и их применения для автоматизации машин, оборудования и приборов. Уч. пос. для а/транспортной техники. М.: Высш. шк., 1988.
3. Токхайм Р. Микропроцессоры. Курс и упражнения. Пер. с англ. М.: ЭАИ, 1987. 336 с.
4. Уильямс Г.Б. Отладка микропроцессорных систем. Пер. с англ. М.: ЭАИ, 1988. 253 с.
5. Фурунжев Р.И. МикроЭВМ в динамических системах. Мн.: Выш. шк., 1982. 207 с.
6. Шилейко А.В. Микропроцессоры. М.: РиС, 1986. 112 с.
7. Краткий терминологический словарь по микропроцессорной технике. М.: РЦНТИ, 1984. 104 с.
8. Мячев А.А. Мини – и микроЭВМ систем обработки информации. Справочник. М.: ЭАИ, 1991. 299 с.
9. Лазарев В.Г., Питль Е.И. Синтез управляющих автоматов. М.: ЭАИ, 1989. 328 с.
10. Альт В.В., Добролюбов И.П., Савченко О.Ф. Информационное обеспечение экспертизы состояния двигателей. - Новосибирск: Изд-во СО РАСХН, 2001.- 220 с.
11. Добролюбов И.П., Савченко О.Ф., Альт В.В. Идентификация состояния сельскохозяйственных объектов измерительными экспертными системами/ РАСХН, Сиб. отд-ние. –СибФТИ.- Новосибирск. 2003. –209с.

Оглавление

Введение	3
Тема 1. Общие принципы управления с применением средств автоматизации. 1.1. Основные термины и определения	4
1.2. Классификация систем автоматизации, их назначение и краткое описание	14
Тема 2. Функциональное (математическое) описание САУ.	
2.1. Основные свойства и характеристики САУ при их функциональном описании	32
2.2. Характеристики систем и их элементов (в том числе ОАУ) в переходном (динамическом) режиме	35
2.3. Уравнение динамики САУ	37
2.4. Морфологическое (структурное) описание САУ	44
Тема 3. Особенности нелинейных САУ. 3.1.Определения.	
Методы линеаризации характеристик	53
3.2. Особенности дискретных САУ	59
3.3. Основные характеристики импульсных систем	62
3.4. Уравнения импульсных систем	69
3.5. Процессы в импульсных системах	70
3.6. Основные характеристики замкнутой импульсной системы	76
Тема 4. Информационно-измерительная система - как измерительно-преобразовательный элемент САУ	77
Тема 5. Интерфейсы программируемых систем управления.	
5.1. Термины и определения	107
5.2. Принципы организации интерфейса	112
5.3. Классификация интерфейсов	115
5.4. Принципы обеспечения совместимости интерфейсов	134
5.5. Критерии выбора и оценки эффективности интерфейсов	137
5.6. Системные интерфейсы мини- и микроЭВМ	148
5.7. Интерфейсы программно-модульных периферийных подсистем	158
5.8. Интерфейсы локальных сетей	160
5.9. Интерфейсы распределённых систем управления	165
Тема 6. Информационное обеспечение программируемых систем управления. 6.1. Информационные показатели сообщений, сигналов и каналов связи	167
6.2. Информационные параметры непрерывных сигналов	172
6.3. Информационные параметры дискретных сигналов	174
6.4. Способы восстановления исходных функций	180

Тема 7. Метрологическое обеспечение ПСУ. 7.1. Точность, достоверность и информативность измерительной информации	184
7.2. Обоснование набора информативных косвенно измеряемых (диагностических) параметров	197
Тема 8. Методика выбора и обоснования параметров программируемых микропроцессорных систем автоматического управления. 8.1. Стадии создания технического обеспечения программируемых систем управления на основе микропроцессорной техники	201
8.2. Обоснование структуры ПСУ, выбор микроЭВМ (микропроцессорной системы - МПС)	205
8.3. Обоснование устройства сопряжения микроЭВМ с объектом	211
8.4. Определение необходимого быстродействия микроЭВМ (МПС) и объёма памяти	216
8.5. Выбор технических средств, входящих в ПСУ	222
Тема 9. Алгоритмическое и программное обеспечение микропроцессорных программируемых систем управления.	
9. 1. Классификация алгоритмов функционирования ПСУ	235
9.2. Организация ввода-вывода информации	236
9.3. Структура программного обеспечения	239
Тема 10. Пример расчёта ПСУ на микропроцессорной технике.	
10.1. Исходные данные	254
10.2. Расчёт показателей МПС	257
Литература	264
Оглавление	266
Приложение	268

ПРИЛОЖЕНИЕ

Приложение 1

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Абонент (Subscriber) — часть интерфейсной системы (сети), выполняющая и реализующая протокол системы

Абонентская система (Subscriber System) — система, выполняющая прикладные процессы пользователей

Адаптер (Adapter) — блок для соединения устройств, использующих различные интерфейсы

Адаптер интерфейсный (Adapter Interface) — часть устройства, обеспечивающая его подсоединение к интерфейсу

Адресация (Addressing) — способ идентификации абонентов интерфейса, системы, сети

Адресация географическая (Addressing Geographical) — способ идентификации абонентов по месту их физического размещения в системе

Адресация логическая (Addressing Logical) — способ идентификации абонентов по их логическому адресу

Арбитр (Arbiter) — устройство (схема), явным образом определяющее приоритет на получение ресурсов интерфейса

Арбитраж (Arbitration) — процедура определения устройства с наивысшим приоритетом

Архитектура (Architecture) — понятие, определяющее совокупность базовых технических и программных средств, обеспечивающих создание различных структур систем и способов их взаимодействия

Архитектура соединения открытых систем, ACOC (Architecture Interconnection of Open Systems) — концептуальная основа, определяющая характеристики и средства систем; предложена МОС

Асинхронный (Asynchronous) — обмен, при котором операция передачи по интерфейсу происходит после получения сигнала от приемника, подтверждающего готовность к операции, и оканчивается подтверждением о завершении операции передачи

Ввод (Input) — процедура передачи данных от источника (исполнителя) к приемнику (задатчику)

Ввод-вывод (Input-Output) — процедура ввода-вывода

Взаимодействие с подтверждением (Handshaking) — процедура синхронизации обмена, при которой сигнал подтверждения посылается обратно для указания о получении (выдаче) информации

Вывод (Output) — процедура передачи данных от задатчика (источника) к исполнителю (приемнику)

Датаграмма (Datagram) — блок данных, передаваемый через подсеть без организации соединения между объектами транспортного уровня

Доступ (Access) — процедура установления связи с абонентом

Доступ к памяти прямой, ПДП (Direct Memory Access, DMA) — процедура прямой передачи данных между ПУ и ОЗУ

Доступ случайный (Access Accidental) — процедура доступа, позволяющая абоненту передавать данные без явной предварительной координации с другими абонентами

Драйвер (Driver) — блок управления, формирующий нормируемые сигналы на линиях интерфейса

Европлата (Eurocard) — печатная плата, соответствующая требованиям стандартов МЭК 297, ТК48Д

Евросоединитель (Euroconnector) — соединитель косвенного контактирования, устанавливаемый на Европлату и соответствующий требованиям стандарта МЭК 603-2

Задатчик, ведущий (Master) — устройство, выступающее в данный момент инициатором обмена с другим устройством, обычно с исполнителем

Идентификация (Identification) — механизм выявления устройства, запрашивающего сеанс связи

Интерфейс (Interface) — 1. Совокупность правил обмена данными и требований к средствам, обеспечивающим взаимодействие компонентов в системе. 2. Средство стандартного сопряжения

Интерфейс ввода-вывода (Interface Input-Output) — интерфейс, используемый в ЭВМ для подключения контроллеров системных ПУ

Интерфейс внутрислотных (Interface Backplane) — интерфейс, обеспечивающий взаимодействие функциональных блоков, расположенных в пределах одного каркаса (крейта)

Интерфейс внутрислотный (Interface Interboard) — интерфейс, обеспечивающий взаимодействие электронных компонентов (МП, БИС, СБИС), расположенных на одной печатной плате

Интерфейс логический (Interface Logical) — совокупность правил, алгоритмов и временных условий обмена данными между компонентами системы

Интерфейс межслотный (Interface System) — интерфейс, обеспечивающий взаимодействие функционально завершенных устройств в системе

Интерфейс программируемый периферийный (Interface Programmable Peripheral) — средство сопряжения ПУ, функции которого могут быть изменены программным образом

Интерфейс физический (Interface Physical) — совокупность физических, механических и функциональных характеристик средств, реализующих взаимодействие

Интерфейсная плата, карта (Interface Board) — интерфейсный блок, реализованный на печатной плате

Интерфейсная система (Interface System) — совокупность интерфейса и конструктивных средств для реализации функционально и конструктивно завершенной системы

Интерфейсная функция (Interface Function) — часть алгоритма, реализующая определенную операцию взаимодействия

Интерфейсные БИС (узлы) (Interface LSIs) — встроенные в интерфейсные компоненты БИС (узлы) сопряжения, конструктивно неотделимые от компонентов

Интерфейсный блок (Interface Module) — конструктивно и функционально завершенная часть устройства, обеспечивающая взаимодействие с интерфейсом

Интерфейсный повторитель (Interface Repeater) — устройство, обеспечивающее восстановление сигналов интерфейса и увеличение длины и расширение топологии системы

Интерфейсный преобразователь (Interface Converter) — устройство, обеспечивающее непосредственное сопряжение различных интерфейсов

Интерфейсный сегмент (Interface Segment) — участок кабеля интерфейса, не имеющий ни одного повторителя

Интерфейсный сегментатор (Interface Linker) — устройство, обеспечивающее взаимодействие различных интерфейсных сегментов

Исполнитель ведомый (Slave) — устройство, выбранное задатчиком для обмена данными

Канал связи (Channel Communication) — совокупность аппаратуры передачи данных и линий связи

Контроллер (Controller) — устройство, выполняющее функции управления передачей данных по интерфейсу

Контроль по четности (Parity Check) — метод контроля, основанный на сравнении кодов по модулю два

Крейт, каркас, кассета (Crate) — каркас для размещения встраиваемых блоков, модулей

Крейт-контроллер (Crate Controller) — устройство управления крейтом

Линии выборки устройства (Lines Device Selection) — линии, по которым передается адрес ПУ

Линии связи (Lines of Communication) — физическая среда, в которой осуществляется передача сигналов

Линия (Line) — часть физического канала интерфейса, соединяющая два и более компонента интерфейса

Магистраль (Bus, Way) — набор линий и шин интерфейса

Магистраль последовательная (Highway Serial) — кольцевая магистраль, в которой контроллеры соединяются последовательно

Множественный доступ с контролем передачи и обнаружением столкновений (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection, CSMA/CD) — процедура доступа в моноканал, обеспечивающая обнаружение и устранение столкновений кадров путем их повторной передачи

Моноканал (Monochannel) — подсистема на базе монопольно используемой физической среды, обеспечивающая передачу сигнала от абонента-отправителя сразу всем остальным абонентам

Открытая система (Open System) — система, удовлетворяющая требованиям стандарта 7498 МС

Передача блочная (Transfer Block) — процедура передачи одной или нескольких групп слов (байтов)

Полудуплекс (Halfduplex) — попеременная передача данных по каналу связи в обоих направлениях, но не одновременно

Приоритет (Priority) — параметр устройства или прерывания, определяющий его относительную важность

Протокол (Protocol) — совокупность правил и форматов, определяющая взаимодействие абонентов системы

Разъединение (Disconnection) — процедура отключения друг от друга блоков системы, используемых совместно

Режим байтовый (Mode Byte) — способ передачи данных нескольким устройствам по одному каналу или от них с чередованием байтов данных

Режим монопольный (Mode Burst) — режим использования канала связи для взаимодействия в течение длительного времени только двух абонентов системы

Режим мультиплексный (Mode Multiplex) — режим использования канала связи, при котором один из компонентов системы попеременно взаимодействует с другими одновременно работающими компонентами в интервалы времени, устанавливаемые автоматически

Реконфигурация (Reconfiguration) — процедура изменения связей между устройствами системы, выполняемая вручную или автоматически

Рестарт (Restart) — процедура повторного возобновления иницирования операции в интерфейсе с определенной точки ее запуска

Связь, соединение (Communication) — совокупность физической среды и аппаратуры передачи

Система (System) — совокупность взаимосвязанных элементов, образующая определенную целостность, единство

Система с общей шиной (System Common Bus) — система, в которой все функциональные блоки подсоединены к одному общему интерфейсу

Скорость передачи в линии (Speed Line) — показатель скорости передачи, обычно выражается в бит/с

Совместимость (Compatibility) — способность устройств системы посылать и принимать один и тот же набор сигналов

Соединение двухточечное (Connection Point to Point) — соединение только между двумя устройствами

Соединение многоточечное (Connection Multipoint) — соединение, связывающее более двух абонентов интерфейса

Соединение цепное (Connection Chain) — способ подключения устройств к интерфейсу, при котором интерфейс соединяется с первым устройством, которое, в свою очередь, связывается со следующим и т. д.

Сообщение (Message) — группа слов, передаваемая и принимаемая как единое целое

Сообщения формат (Message Format) — длина сообщения, его состав, размеры и взаимное расположение отдельных элементов

Средство (Facility) — имеющийся в системе механизм, рассчитанный на достижение некоторых конкретных целей

Станция (Station) — часть системы, предназначенная для соединения с другими абонентами системы

Структура (Structure) — топология соединения или распределения шин системы

Структура кольцевая (Structure Ring) — структура, при которой управляющее устройство связано с управляемыми устройствами по кольцевой схеме

Структура комбинированная (Structure Combined) — структура, содержащая элементы магистральной и радиальной структур

Структура магистральная (Structure Bus) — структура, при которой все устройства, подсоединенные параллельно к общей магистрали, могут взаимодействовать друг с другом

Структура радиальная (Structure Radial) — структура, при которой устройства взаимодействуют друг с другом с помощью индивидуальных линий

Структура цепочечная (Structure Chain) — структура, при которой взаимодействующие устройства соединены между собой последовательно

Супервизор (Supervisor) — управляющее устройство, выполняющее на интерфейсе привилегированные операции

Тайм-аут (Time-Out) — интервал времени, выделяемый до наступления некоторого события в интерфейсе

Трафик (Traffic) — поток данных в сети или между сетями

Требование (Demand) — сигнал запроса на обслуживание от ПУ

Уровень (Layer) — относится к уровню иерархического логического описания области взаимодействия (открытых систем)

Примеры реализации ПСУ и их элементов

Уровень физический (Layer Physical) — уровень, определяющий механические, электрические и процедурные средства передачи информации через физические средства соединения

Цепь (Chain) — относится к способу подключения устройств, при котором каждое следующее подключается к предыдущему по принципу цепи

Цепь приоритетная (Chain Daisy) — подключение устройств, при котором позиция в цепи определяет приоритет прерывания

Шина (Bus) — группа линий связи, предназначенных для выполнения определенной операции в процессе обмена данными

Широковещательный режим (Broadcast Mode) — передача данных сразу всем абонентам по общему для них адресу

1. Промышленная сеть CAN

В устройствах серии ADAM-5000/CAN для организации сетевого взаимодействия реализован один из наиболее популярных стандартов промышленных сетей - CAN (Controller Area Network - сеть уровня контроллеров), который устанавливает правила обмена данными между контроллерами, датчиками и исполнительными механизмами. CAN является системой последовательной передачи данных, в которой обмен информацией между узлами осуществляется в широковещательном режиме. Первоначально данный стандарт был разработан для реализации информационного обмена между интеллектуальными устройствами связи с объемом по последовательному каналу и на автомобильном транспорте. Однако на сегодняшний день CAN является одним из наиболее широко распространенных стандартов в сфере промышленной автоматизации

Архитектура с несколькими ведущими узлами

В сети с интерфейсом CAN прямой обмен данными возможен между любыми абонентами сети. В отличие от систем, основанных на принципе "ведущий-ведомый", в системах с интерфейсом CAN не все данные должны передаваться в адрес ведущего узла для последующих пересылок другим абонентам, поскольку существует возможность обмена данными между узлами сети, минуя ведущий узел. Даже в случае его отказа система все-таки сохранит свою работоспособность, правда, с урезанными возможностями.

Обработка событий в прикладной области

В устройствах серии ADAM-5000/CAN реализована функция немедленной реакции на изменения состояния контролируемого объекта путем использования механизма обработки прерываний. Основное назначение данной функции состоит в увеличении эффективности обмена информацией за счет того, что передача данных инициируется устройством только при возникновении predeterminedных пользователем событий. При наступлении такого события устройство осуществляет передачу данных в широковещательном режиме для всех узлов сети. В результате ведущий компьютер сети или контроллер узнают о наступлении события без каких-либо задержек, т.е. практически мгновенно.

Открытый коммуникационный протокол

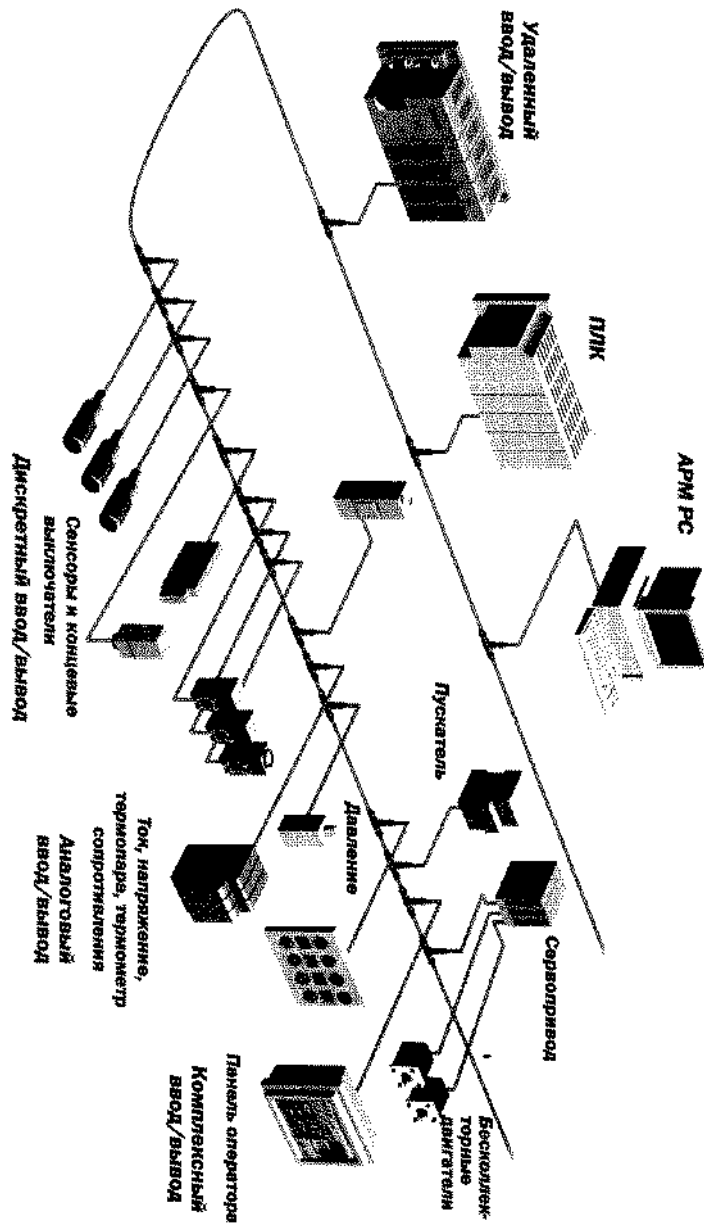
Устройства серии ADAM-5000/CAN поддерживают следующие коммуникационные протоколы прикладного уровня: DeviceNet фирмы Allen-Bradley и CANopen, основанный на протоколе CAL, который разработан ассоциацией CIA (CAN in Automation). Открытость обоих протоколов обеспечивает возможность использования в рамках одной сети устройств различных независимых производителей, а также возможность организации сетевого взаимодействия между устройствами и системами различного назначения через общий канал связи. В комплект поставки устройства ADAM-5000/CAN входит программное обеспечение как для сетевого протокола DeviceNet, так и для CANopen. Пользователь может использовать тот из них, который наилучшим образом подходит для решения стоящей перед ним задачи.

Высокая надежность и достоверность передаваемой информации

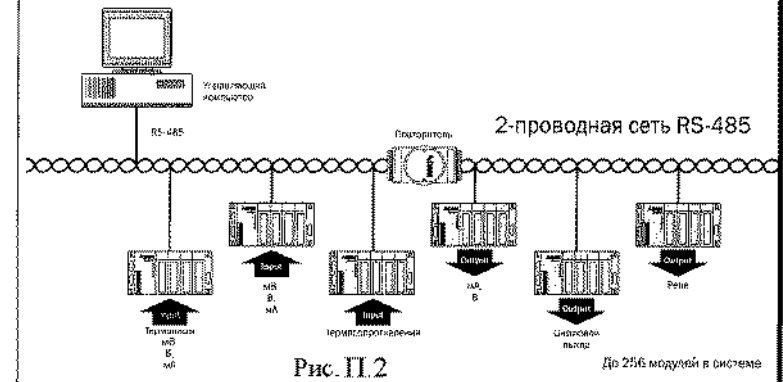
Высочайшая надежность и достоверность передаваемой информации является одной из наиболее значимых характеристик систем на базе интерфейса CAN. Разработанный для использования в системах управления автомобильным двигателем в условиях с высоким уровнем электромагнитных помех, этот интерфейс обладает высоким уровнем защиты передаваемой информации. Указанное свойство обеспечивается применением пяти механизмов обнаружения ошибок, с помощью которых гарантируется достоверность передаваемых данных. Так, например, повторная передача сообщения после обнаружения ошибки осуществляется максимум через промежуток времени, необходимый для передачи 29-разрядной идентификации, а для выявления и восстановления ошибок с кратностью до 5 используется 6-разрядный код Хэмминга. Ни одна другая из промышленных шин семейства Fieldbus не обеспечивает такого высокого уровня надежности.

Одним из дополнительных достоинств протокола CANopen является возможность организации многоточечной сети, в которой каждый узел может быть инициатором передачи информации. Данное свойство обеспечивает высочайшую гибкость систем на базе устройств серии ADAM-5000/CAN. Разработчик системы имеет возможность установления логических связей между модулями (каналами) ввода/вывода, принадлежащими любым двум блокам процессора ADAM-5000/CAN.

Рис. П.1. Структурная схема промышленной сети CAN



Структурная схема САУ на базе стандарта RS-485



Гарантированная работоспособность а промышленных условиях

Устройства серии ADAM-5000 сохраняют работоспособность в диапазоне температур от -10 до +70°C. Электрическое питание устройств осуществляется нестабилизированным постоянным напряжением от 10 до 30 В. Кроме того, изделия оснащены средствами защиты от повреждения при изменении полярности напряжения питания. Трехуровневая гальваническая изоляция (по питанию, со стороны модулей ввода/вывода и со стороны интерфейса последовательной передачи данных) обеспечивает устойчивость к помехам и позволяет устранить гальваническую связь с оборудованием на контролируемом объекте.

Простота технического обслуживания и понсна неисправностей

В устройствах серии ADAM-5000 для выявления неисправностей используются аппаратно-программные средства самодиагностики. Кроме того, для автоматического рестарта при непредвиденной остановке исполнения встроенного программного обеспечения блок процессора ADAM-5000 оснащен сторожевым таймером. Сетевой идентификатор (ID) каждого устройства может быть легко установлен с помощью специально предусмотренного микропереключателя.

Обширная программная поддержка

Устройства серии ADAM-5000 имеют средства интеграции с большинством стандартных средств разработки программного обеспечения для приложений сбора данных и управления. Для создания приложений, исполняемых в среде Windows, имеется набор библиотек динамической компоновки (DLL). Совместимые с OPC драйверы (OPC-серверы) обеспечивают возможность интеграции устройств серии ADAM-5000 с такими программными средствами, как InTouch, FIX DMACS, Citect, Genesis и др. Система разработки программного обеспечения сбора данных и управления VisiDAQ (Genie) и HMI/SCADA-система с распределенной архитектурой Advantech FX предоставляют пользователю возможность создания систем на базе изделий серии ADAM-5000 в кратчайшие сроки.

Простота монтажа

Изделия серии ADAM-5000 могут устанавливаться на DIN-рейку или на панель, что обеспечивает простоту подключения источников сигналов, последующую модификацию и техническое обслуживание системы. Для создания многоточечной сети на базе устройств серии требуется только прокладка двухпроводной симметричной линии связи.

2. Многоточечные сети на базе стандарта RS-485 и модулей ADAM-4000

Альтернативный способ создания автономной системы управления

Имеется возможность создания автономной системы управления на базе модулей серии ADAM-4000 посредством использования в качестве ведущего узла сети IBM PC совместимого контроллера связи ADAM-4500. Программное обеспечение контроллера связи, создаваемое на языке высокого уровня, подобно Си, сохраняется пользователем во флэш-ПЗУ контроллера путем загрузки через порт последовательной связи, входящий в его состав. Это позволяет легко адаптировать программное обеспечение в соответствии со спецификой автоматизируемого объекта.

Универсальное конструктивное исполнение

Прочное, модульное и компактное конструктивное исполнение модулей обеспечивает простоту и удобство их монтажа на DIN-рейку, плоскую панель, а также возможность установки друг на друга. Для присоединения внешних цепей к модулям предусмотрены извлекаемые клеммные соединители с винтовой фиксацией проводников, что облегчает процесс электрического монтажа, технического обслуживания и дальнейшей модернизации системы.

Пригодность для эксплуатации в промышленных условиях

Электрическое питание модулей серии ADAM-4000 осуществляется нестабилизированным постоянным напряжением от 10 до 30 В. Кроме того, в модулях реализованы средства защиты от переплюсовки напряжения питания. Отключение и подключение цепей питания к модулю может производиться без нарушения работоспособности сети, в составе которой функционирует данный модуль.

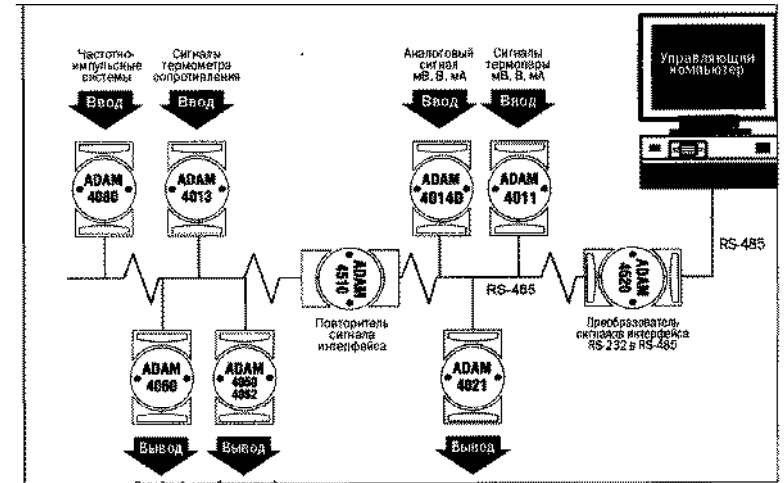
Устройства серии ADAM-4000 объединяются в сеть на базе стандарта EIA RS-485, который является одним из наиболее распространенных промышленных стандартов двунаправленной последовательной передачи данных по симметричной двухпроводной линии связи. Стандарт EIA RS-485 ориентирован на применение в промышленных условиях для высокоскоростной передачи информации на большие расстояния. Во всех модулях серии ADAM-4000 имеется гальваническая развязка интерфейса последовательной передачи данных для предотвращения взаимного влияния территориально-распределенных устройств друг на друга, а также для снижения вероятности повреждения модулей импульсными помехами и выбросами напряжения в цепях питания и линии связи.

Двухпроводная линия связи

Для обмена данными в системах на базе устройств ADAM-4000 используется одна витая пара. Для обеспечения качественной, надежной связи в устройствах серии ADAM-4000 реализованы специальные цепи подавления и защиты от помех. Это упрощает монтажные и пусконаладочные работы, а также позволяет снизить общую стоимость системы за счет сокращения затрат на кабельную продукцию, разъемные соединения, повторители и дополнительные фильтры.

Защита от помех повышенной интенсивности

Для защиты устройств от атмосферных разрядов, наводок и электромагнитных помех повышенной интенсивности в подсистему последовательной связи модулей серии ADAM введены высокоскоростные цепи подавления выбросов напряжения и защиты от перегрузки.



В сеть последовательной передачи данных на базе стандарта RS-485 при использовании повторителей может быть объединено до 256 устройств серии ADAM-4000

Рис. П.3 Структурная схема сети с интерфейсами RS-232/485

Расширение сети

Для увеличения протяженности линии связи, на основе которой организуется сеть модулей ADAM-4000, а также для включения в состав сети более 32 устройств имеется возможность применения повторителя ADAM-4510, предназначенного для усиления сигналов интерфейса RS-485. Каждый повторитель обеспечивает возможность организации очередного сегмента сети длиной до 1200 м, содержащего до 32 модулей серии ADAM-4000. Общее количество устройств, образующих сеть и управляемых через один последовательный порт управляющего устройства системы, может составлять 256.

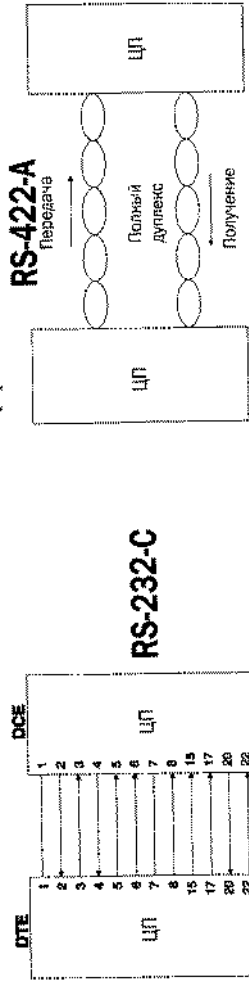
Преобразование сигналов интерфейса RS-232C в RS-485

Последовательные порты интерфейса RS-232C входят в состав большинства вычислительных систем промышленного назначения. Несмотря на широкое распространение, для интерфейса RS-232C характерны существенные ограничения на скорость передачи данных,

протяженность линии связи и возможность создания многоточечных систем передачи информации. Стандарт EIA RS-485 позволяет преодолеть указанные ограничения за счет использования симметричной линии связи и дифференциальной схемы включения приемопередатчиков.

Преобразователь сигналов интерфейса RS-232C в RS-485 ADAM-4520 обеспечивает возможность использования преимуществ стандарта RS-485 в системах последовательной передачи информации. При этом программное обеспечение полудуплексного обмена данными на основе интерфейса RS-232C может применяться без внесения каких-либо изменений. Устройство ADAM-4520 позволяет создавать промышленные сети последовательной передачи данных с линией связи большой протяженности.

Последовательные интерфейсы



Это один из наиболее распространенных последовательных интерфейсов, соответствующий стандарту EIA RS-232-C, известный также как интерфейс CCITT V.24. Первоначально разработанный для связи терминалов с центральным компьютером, в настоящее время этот интерфейс имеет очень широкую область применения.

Интерфейс RS-232 предназначен для соединения двух устройств. Передатчик одного устройства соединяется с приемником другого, и наоборот, что обеспечивает полудуплексный режим обмена данными. Для управления подключенным устройством можно использовать дополнительные линии порта RS-232, или специальные символы, добавляемые к передаваемым данным.

Стандарт EIA RS-232-C, CCITT V.24
Скорость передачи 19200 бит/с (по стандарту)
Протяженность линии связи 15 м (по стандарту)
Вид сигнала Потенциальный, с общим проводом
Число передатчиков 1
Число приемников 1
Организация связи Полный дуплекс, «точка-точка»

Стандарт EIA RS-422-A был разработан в 1975 году для обмена данными между центральным компьютером и периферийным оборудованием. Интерфейс использует симметричную линию связи и обеспечивает работу на расстоянии до 1200 метров и максимально возможную скорость передачи до 10 Мбит/с.

Интерфейс обеспечивает хорошее подавление помех общего вида за счет использования витой пары в качестве линии связи. Каждый передатчик может быть нагружен на несколько (до 10) приемников, что обеспечивает возможность одновременного обмена с несколькими устройствами.

Стандарт EIA RS-422-A, CCITT V.11
Скорость передачи 10 Мбит/с (максимум)
Протяженность линии связи 1200 м (максимум)
Вид сигнала Дифференциальный, витая пара
Число передатчиков 1
Число приемников 10
Организация связи Полный дуплекс, «точка-точка»

3. Многофункциональные платы АЦП

Общие сведения

Платы PCI-1710/1710HG представляют собой многофункциональные устройства с шиной PCI для сбора и обработки сигналов. Современные схемные решения обеспечивают высокое качество и выполнение пяти основных функций для измерений и контроля: АЦП с разрешением 12 бит, ЦАП, дискретного ввода и вывода и функции счетчика-таймера.

Автоматическое сканирование каналов

Платы PCI-1710/1710HG имеют устройство для автоматического сканирования каналов. Это устройство независимо от программного обеспечения управляет мультиплексором во время выборки. В статической памяти на плате хранятся величины коэффициента усиления по каждому каналу. Это обеспечивает возможность быстрого (до 100 кГц) опроса каналов с различными способами подключения входного сигнала (дифференциальным или с общим проводом) и с различными коэффициентами

Буфер FIFO объемом 4К значений

Платы PCI-1710/1710HG имеют буфер FIFO (First in First out — «первым вошел — первым вышел») объемом 4К значений для быстрой передачи данных и обеспечения высокой и предсказуемой скорости работы платы под Windows. Плата генерирует прерывание при заполнении буфера FIFO наполовину.

Программируемый счетчик и схема запуска

На плате имеется программируемый счетчик для генерации импульсов запуска АЦП, выполненный на базе микросхемы 82C54, представляющий собой три 16-разрядных счетчика с опорной частотой 10 МГц. Один счетчик предназначен для подсчета событий по входным каналам, а два остальных включены каскадно и образуют 32-разрядный таймер схемы запуска.

Экранированный кабель для снижения уровня шумов

Специально разработанный кабель PCL-10168 имеет по отдельности экранированные аналоговые и дискретные линии, выполненные в виде витых пар, для уменьшения взаимных помех и обеспечения защиты от внешних электромагнитных полей.

Основные характеристики

- 16 входных каналов с общим проводом или 8 дифференциальных (в любом сочетании)
- АЦП с разрешением 12 бит и частотой выборки до 100 кГц
- Программируемый коэффициент усиления по каждому каналу
- Встроенный буфер FIFO объемом 4К значений.
- Два канала ЦАП 12 бит
- 16 дискретных входов и 16 дискретных выходов

- Программируемая схема запуска

Технические данные

Аналоговые входы

- Количество каналов: 16 с общим проводом или 8 дифференциальных (устанавливается программно)
- Разрешение: 12 бит
- Встроенный буфер FIFO: 4000 значений
- Время преобразования: 8 мкс
- Диапазоны входного напряжения (управляются программно):

	PCI-1710	PCI-1710HG
Двуполярные, В	±10; ±5; ±2,5; ±1,25; ±0,625	±10; ±5; ±1; ±0,5; ±0,1; ±0,05; ±0,01; ±0,005
Однополярные	0...10; 0...5; 0...2,5; 0...1,25	0...10; 0...1; 0...0,1; 0...0,01

- Допустимая перегрузка по входу: ± 30 В
- Подавление помехи общего вида (CMRR)

PCI-1710		PCI-1710HG	
Коеф. усиления	CMRR	Коеф. усиления	CMRR
0,5; 1	75 дБ	0,5; 1	75 дБ
2	80 дБ	10	90 дБ
4	84 дБ	100	106 дБ
8	84 дБ	1000	106 дБ

- Максимальный поток данных:
PCI-1710: 100 кГц;
PCI-1710HG

Коеф. усиления	Скорость
0,5; 1	100 кГц
5, 10	35 кГц
50, 100	7 кГц
500, 1000	770 Гц

- Предел основной погрешности измерения

PCI-1710HG		
Коеф. усиления	Предел основной погрешности измерения	Примечание
0,5, 1	0,01% полной шкалы ± 1 МР	дифф./о.п.
5, 10	0,02% полной шкалы ± 1 МР	дифф./о.п.
50, 100	0,04% полной шкалы ± 1 МР	дифф.
500, 1000	0,08% полной шкалы ± 1 МР	дифф.

- Нелинейность: ±1 МР
- Входное сопротивление: 1 ГОм
- Режимы запуска: программный, внешний, от схемы запуска

Аналоговые выходы

- Количество каналов: 2
- Разрешение: 12 бит
- Относительная точность: ±1/2 МР
- Точность коэффициента усиления: ±1 МР
- Скорость обновления данных: до 100 кГц
- Скорость нарастания выходного напряжения: 10В / мкс
- Диапазон выходного напряжения: от 0 до +5 В, от 0 до +10 В с внутренним опорным сигналом, от 0 до +10 В с внешним опорным сигналом

Дискретный ввод

- Количество каналов: 16
- Входное напряжение
низкий уровень: не более 0,4 В, ток потребления -0,2 мА;
высокий уровень: не менее +2,4 В, ток потребления 20 мкА

Дискретный вывод

- Количество каналов: 16
- Выходное напряжение
низкий уровень: не более 0,4 В, нагрузочная способность 8 мА;
высокий уровень: не менее +2,4 В, нагрузочная способность 0,4 мА

Параметры счетчика и схемы запуска

- Устройство: Intel 82C54 совместимое
- Счетчики: три, разрядность 16 бит, два образуют 32-битовую программируемую схему запуска, один свободен для задач пользователя
- Уровни напряжения: TTL/CMOS совместимые
- Опорная частота
канал 1: 10 МГц;
канал 2: вход подключен к выходу канала 1;
канал 0: внутренняя 1 МГц или внешняя (до 10 МГц), управляется программно

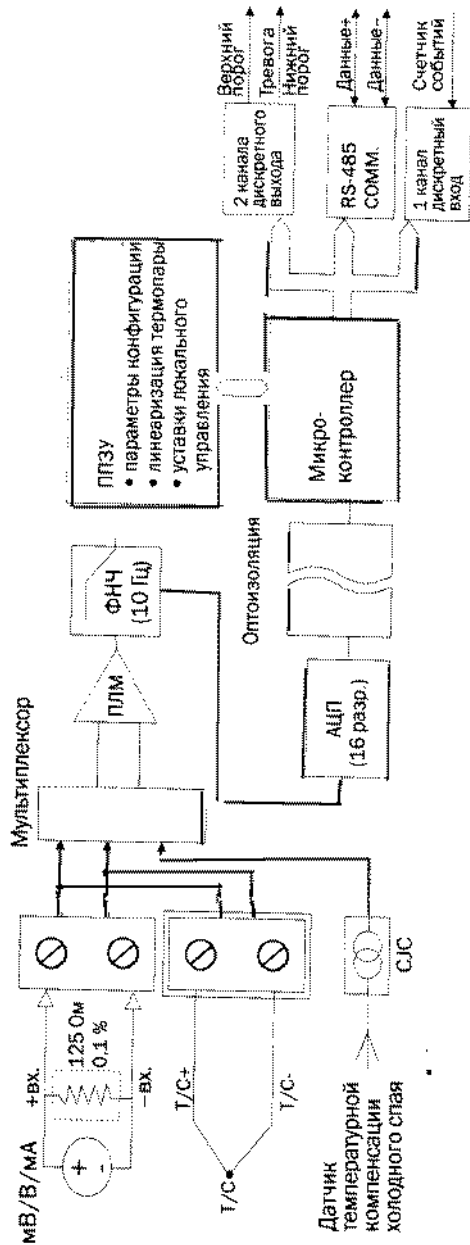


Рис. П.5. Структурная схема модуля аналогового ввода АДАМ-4011

Модули аналогового ввода

Модули аналогового ввода имеют в своем составе 16-разрядный сигма-дельта аналого-цифровой преобразователь (АЦП), управляемый микропроцессором и предназначенный для приема и преобразования сигналов термомпар, термометров сопротивления, а также аналоговых сигналов в виде тока или напряжения. Микропроцессор выполняет преобразование цифровых отсчетов аналогового сигнала, поступающих с выхода АЦП, в значения, представляемые в одном из следующих форматов: инженерные единицы, проценты полной шкалы, дополнительный код или Ом. После получения запроса на передачу данных от ведущего узла сети на базе RS-485 микропроцессор модуля передает отсчет входного аналогового сигнала, представленный в одном из перечисленных форматов, в адрес ведущего узла сети.

Модули аналогового ввода серии АДАМ-4000 обеспечивают защиту ведущего узла сети от влияния гальванической связи, благодаря имеющимся в их составе цепям гальванической развязки с напряжением изоляции 3000 В постоянного тока.

Модули аналогового ввода АДАМ-4011/4011D/4012 имеют в своем составе каналы дискретного ввода/вывода, которые могут использоваться для подсчета импульсов, фиксации дискретных событий и реализации функций локального дискретного управления при достижении входным аналоговым сигналом предварительно заданных значений.

Оба канала дискретного вывода в этих модулях представляют собой транзисторные ключи с открытым коллектором. Логическое состояние каждого канала может быть изменено по команде от управляющего компьютера сети модулей АДАМ. Это позволяет использовать данные каналы совместно с промежуточными реле для дистанционного управления силовым оборудованием, таким как насосы, нагревательные элементы и т.п. Канал дискретного ввода каждого модуля может быть применен для контроля положения коммутационных аппаратов, находящихся в месте расположения модуля.

Преобразователь сигналов интерфейса RS-232C в RS-485 АДАМ-4520 обеспечивает возможность использования преимуществ стандарта RS-485 в системах последовательной передачи информации. При этом программное обеспечение полудуплексного обмена данными на основе интерфейса RS-232C может применяться без внесения каких-либо изменений. Устройство АДАМ-4520 позволяет создавать промышленные сети последовательной передачи данных с линией связи большой протяженности.

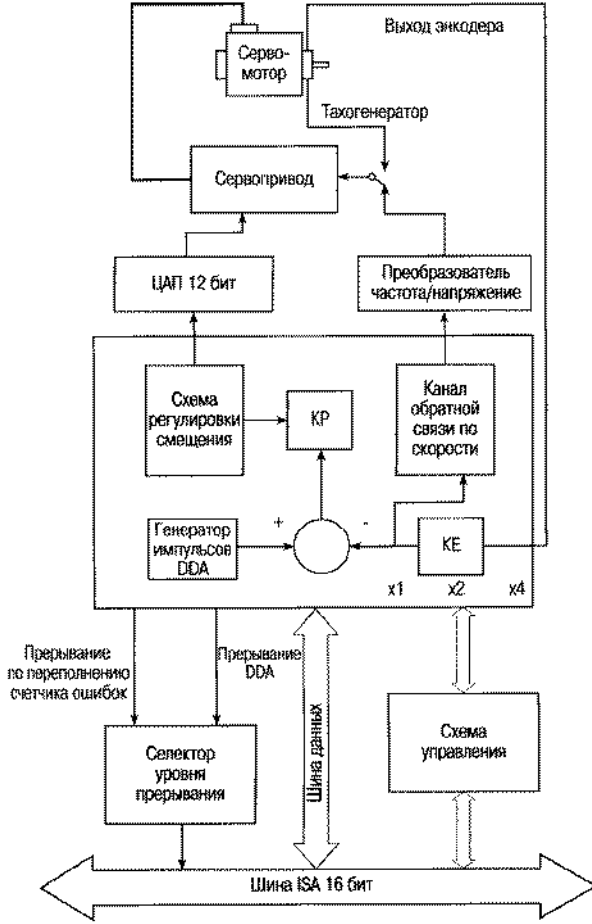
Универсальный протокол обмена

Протокол обмена с устройствами серии АДАМ-4000 представляет собой набор символьных строк в формате ASCII. Опрос устройств прикладными программами состоит из простых операций записи и чтения символьных строк из последовательного порта, что легко реализуется на любом языке программирования, подобном Си, Паскаль и Бейсик. Поддержка символьного протокола в формате ASCII означает, что имеется возможность создания сети устройств серии АДАМ на базе управляющих компьютеров практически любых типов и производителей.

4. Плата трёхкоординатного управления сервоприводами

Плата PCL-832 поставляется в комплекте с библиотекой программ на C/C++, позволяющей использовать для управления команды высокого уровня вместо ассемблерных. Библиотека поддерживает следующие функции:

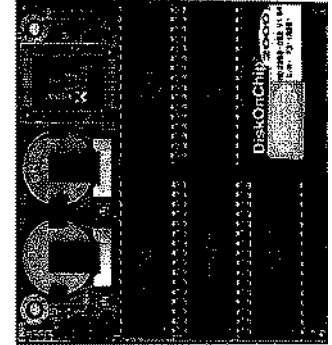
- **системные** (инициализация и сброс платы);
- **служебные** (установка параметров, чтение счетчика ошибок, задание ускорения/замедления, установка координат и др.);
- **управление перемещением** (переход в начальную позицию, линейная/круговая интерполяция и шаг и др.);
- **разное** (стоп, выход, продолжить, считать позицию и др.).



5. Запоминающие устройства

Что такое статическое ОЗУ, ППЗУ и флэш-ППЗУ?

Микросхемы ППЗУ (перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство, ППЗУ) являются устройствами постоянного энергонезависимого хранения данных с электрической записью и стиранием при помощи источника ультрафиолетового излучения. СОЗУ (статическое оперативное запоминающее устройство, SRAM) пишется и читается данными, но для обеспечения энергонезависимого хранения данных требуется батарея резервного питания. Флэш-ППЗУ (Flash ППЗУ) так же хорошо, как ППЗУ, хранит данные, но при этом стирается электрически и позволяет сохранять большие объемы данных.



Что такое твердотельный диск?

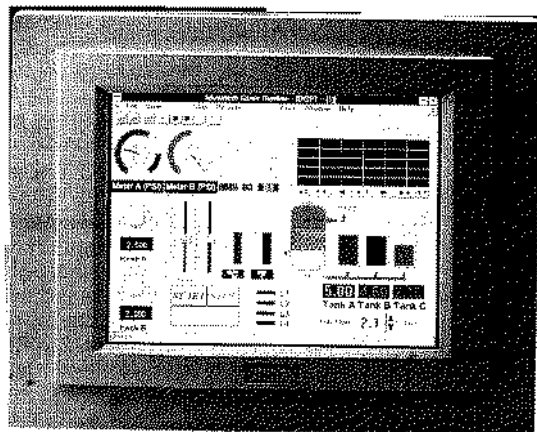
Твердотельными дисками (Solid State Disk, SSD) называются устройства хранения данных, в которых информация записывается в полупроводниковые элементы памяти (ОЗУ, ПЗУ или флэш-ППЗУ) вместо традиционных магнитных носителей прикладных HDD и HDD. Практически любой накопитель данных может быть заменен на SSD и при этом сохранится полная совместимость с наиболее распространенными операционными системами типа DOS или Windows. Это обеспечивается изменением INT 13 BIOS, которое производит встроенное программное обеспечение (ПО) SSD во время начальной загрузки системы. После этого новый обработчик INT 13 транслирует все команды чтения/записи дисков та же командой, чтобы обеспечить корректное чтение/запись микросхем памяти электронного диска. При этом никаких дополнительных драйверов не требуется. Работать с SSD так же просто, как с обычным накопителем А: или С:, используя стандартные команды типа DIR, COPY и т. п.

Когда нужно применять SSD?

SSD обеспечивают быстрый доступ к данным и характеризуются свойствами, которые делают их совершенным решением для критических коммерческих или промышленных применений. Механические диски являются чрезвычайно восприимчивыми к воздействию неблагоприятных факторов при эксплуатации в жестких промышленных условиях, что приводит к аварии. Твердотельные диски обеспечивают более эффективную работу, более длительный срок службы, меньший риск поломки или потери данных.

Флэш-ПЗУ/ОЗУ/ППЗУ диски проявляют свои качества в применениях, в которых требуются различный объем запоминающего устройства, простое расширение памяти, полная совместимость с DOS и защита информации. По сравнению с дисками, имеющими механический привод, SSD способны выдерживать более суровые условия эксплуатации и выполнять операции чтения/записи значительно быстрее. Сторожевые таймеры обеспечивают автономную работу системы, так как они автоматически сбрасывают систему в исходное состояние или перезагружают ее. Платы дисков работают в весьма безопасных условиях, так как они находятся в пределах компьютера и поэтому защищены от неумелого обращения лучше, чем дисководы.

6. Панельный персональный компьютер с 10,4" TFT/DSTN-дисплеем на базе процессора Pentium MMX



Общие сведения

Мультимедийный панельный компьютер PPC-102 поддерживает большинство совместимых с Socket 7 процессоров Intel, AMD и Cyrix, в том числе с MMX-технологией. Оснащенный ярким TFT-дисплеем с разрешением 800×600 пикселей, звуковой подсистемой, ОЗУ объемом до 128 Мбайт и контроллером Ethernet 10/100Base-T, PPC-102 идеально подходит для использования не только в промышленной автоматизации, но и в банках, медицинских учреждениях и т. д.

Область применения PPC-102

- Терминалы информационных систем
- Системы управления аттракционами
- Медицинские системы управления
- Торговые терминалы (POS)
- Автоматизация банков и офисов
- Управление производственными процессами

Компактный ПК с плоским жидкокристаллическим дисплеем

PPC-102 является наиболее универсальным ПК с TFT-дисплеем размером 10,4". Неглубокое компактное шасси позволяет легко устанавливать его на стол, на стену или панель. Открытость системы и широкий набор внешних интерфейсов обеспечивают легкость интеграции PPC-102 в любую систему.

Полный набор портов ввода/вывода

- НГМД: поддерживает один внешний НГМД 1,2/1,44/2,88 Мбайт
- НЖМД: поддерживает 2 EIDE-порта (1 внутренний и 1 внешний)
- 4 последовательных порта: три RS-232 и один RS-232/422/485
- 1 параллельный порт с поддержкой SPP/EPP/ECP
- 1 порт для подключения PS/2 мыши и один для подключения клавиатуры
- 1 порт VGA для подключения внешнего дисплея
- вход микрофона, выход громкоговорителя, линейный вход/выход звука

Технические данные

- Тип процессора: до Pentium MMX 233 МГц Intel, AMD, Cyrix
- Память ОЗУ: до 128 Мбайт, 2 SIMM-модуля
- НЖМД: EIDE-интерфейс (отсек для 2,5" НЖМД)
- Флэш-память: встроенная 512 кбайт DiskOnChip 2000 (по заказу)
- Батарея: литиевая для CMOS
- Сторожевой таймер: 63 уровня, интервал от 1 до 63 с
- Корпус: огнестойкий пластик, степень защиты передней панели IP65
- Система охлаждения: один вентилятор с производительностью 26,88 м³/ч на задней панели
- Габаритные размеры: 342×265×61,5 мм
- Масса: 3,5 кг

7. Адресуемый модуль интерфейса с радиомодемом/модемом для выделенных линий

Общие сведения

Модуль ADAM-4530 является экономичным преобразователем электрических параметров интерфейса RS-232C в RS-485, который предназначен для организации взаимодействия между устройством (устройствами), имеющим порт последовательной передачи данных на базе стандарта RS-485 и работающим в режиме двунаправленного обмена данными, и радиомодемом или модемом для выделенных линий. Радиомодемы или модемы для выделенных линий применяются в системах сбора данных и управления в случае, если контролируемый объект расположен на большом расстоянии от центрального компьютера системы либо находится в труднодоступном месте. Изделие ADAM-4530 представляет собой недорогое средство организации связи между радиомодемом/модемом для выделенных линий и УСО, объединенными в сеть на базе стандарта RS-485.

Встроенный микропроцессор

Модуль ADAM-4530, имеющий в своем составе микропроцессор, может использоваться для реализации интерфейса между сетью устройств на базе RS-485 и радиомодемом/модемом для выделенных линий. Большинство устройств с интерфейсом RS-485 имеют малое время реакции на команды, поступающие в их адрес по сети. Время переключения приемопередатчика радиомодема или модема для выделенной линии, как правило, составляет существенно большую величину. Кроме того, для переключения приемопередатчика радиомодемов или модемов для выделенных линий требуется наличие отдельного сигнала интерфейса RS-232C. В модуле ADAM-4530 реализована возможность программной установки временных задержек между моментом активизации сигнала включения передатчика радиомодема (RTS) и началом передачи данных модулем в адрес радиомодема. Указанная функциональная возможность позволяет существенно сократить затраты за счет устранения необходимости применения отдельного компьютера на удаленном объекте.

Автоматическое управление потоком данных в сети на базе стандарта EIA RS-485

Стандарт RS-485 поддерживает обмен данными в полудуплексном режиме. Это означает, что для приема и передачи информации используется одна и та же двухпроводная линия связи. Как правило, для управления направлением передачи используются сигналы квитирования, подобные RTS (Request to Send — запрос передачи). Специальные цепи, входящие в состав изделия ADAM-4530, производят автоматическое определение направления потока данных и переключение приемопередатчика. Таким образом, не требуется использовать какие-либо сигналы квитирования, а для построения многоточечной сети достаточно иметь только двухпроводную линию связи.

Основные характеристики

- Встроенный микропроцессор
- Скорость обмена до 115200 бит/с
- Подавление помех и выбросов напряжения в линии связи
- Возможность работы при разных скоростях обмена для каждого интерфейса
- Автоматический контроль линии связи RS-485
- Наличие сторожевого таймера
- Индикаторы питания и передачи данных для облегчения поиска неисправностей
- Наличие места для установки согласующих резисторов
- Программная настройка на работу в режимах с адресацией или без адресации
- Возможность монтажа на панель и DIN-рейку
- Хранение параметров связи в энергонезависимой памяти

Технические данные

- Скорость обмена: 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 57600, 115200 бит/с (устанавливается программным способом)
- Требования по питанию: нестабилизированное постоянное напряжение от 10 до 30 В (в модуле предусмотрена защита от переплюсовки напряжения питания)
- Конструктивное исполнение: корпус из пластика ABS с невыпадающими элементами крепления
- Принадлежности: пластиковый монтажный адаптер для установки на DIN-рейку, кронштейн для установки на панель
- Тип соединителя интерфейса RS-232C: розетка DB-9
- Соединитель интерфейса RS-422/485: извлекаемые клеммные колодки с винтовой фиксацией жил проводников (сечение жил от 0,5 до 2,5 мм²)
- Диапазон рабочих температур: от —10 до +70°C
- Габаритные размеры: 120×60 мм
- Потребляемая мощность: 1 Вт

8. Промышленные рабочие станции на базе IBM-PC

Вопрос (В): Каковы преимущества IBM PC совместимых промышленных рабочих станций?

Ответ (О): Основные преимущества состоят в следующем:

- микропроцессоры IBM PC оптимальны по соотношению цена/производительность;
- рабочие станции не являются простой заменой панели оператора, они поддерживают такие функции, как объединение сетей промышленных контроллеров (ПЛК), регистрация параметров и т. д.;
- стандартные операционные системы позволяют выбирать инструментальные средства разработки прикладного программного обеспечения от множества независимых фирм-поставщиков, возможна также разработка заказных прикладных программ, написанных для удовлетворения потребностей пользователя;

В: Каковы применения рабочих станций?

О: По сравнению с традиционными операторскими пультами рабочие станции являются шагом вперёд по мощности и производительности. Они способны:

- автоматически передавать данные как оператору, так и от оператора;
- хранить и анализировать информацию;
- представлять информацию в удобном формате;
- предоставлять возможность оператору непосредственно управлять производственным процессом;
- самостоятельно управлять процессом;
- сокращать издержки производства, увеличивать производительность труда и эффективность управления технологическим процессом.

Рабочие станции заменяют сложно монтируемые пульта управления, обеспечивая значительное увеличение гибкости. Ход процессов управления отображается в графическом виде, позволяя оценить состояние системы с одного взгляда. Рабочие станции обеспечивают безопасность, реагируя на определенные ситуации подачей многократных сигналов тревоги. Сигналы тревоги могут быть поданы быстро с помощью графики и автоматических сообщений оператору. Рабочая станция может быть полезным средством в процессе решения задачи сокращения времени простоя предприятия до минимума.

Информация с различных этапов технологического процесса может быть отображена в реальном времени, сохранена или сделана доступной для организации управления через сеть. Рабочая станция может организовать взаимодействие с любым оборудованием, от ПЛК до универсальных вычислительных машин.

В: Что такое NEMA4/NEMA12?

О: NEMA (National Electrical Manufacturers Association - Национальный союз производителей электротехнического оборудования) — стандарт, классифицирующий корпуса электро-технического оборудования по обеспечиваемой ими степени защиты.

Корпуса, соответствующие Type 4, пригодны для использования как внутри, так и вне помещений. Они обеспечивают полную защиту от пыли, а также дождя, брызг и даже прямых потоков воды. Они также не разрушаются под воздействием града и обледенения. Для получения степени NEMA4 конструктив должен выдержать испытания: погружение в воду, воздействие внешнего обледенения, тест на образование ржавчины. Корпуса, соответствующие Type 4, не предназначены для защиты от внутренней конденсации или внутреннего обледенения.

Корпуса, соответствующие Type 12, предназначены главным образом для применения внутри помещений. Они защищают от пыли, грязи, капель неагрессивных жидкостей, таких как масла или охлаждающие агенты. Они должны выдерживать тесты на просачивание, пылезащиту и образование ржавчины. Корпуса Type 12 не предназначены для защиты от внутренней конденсации.

В: Каково различие между корпусами NEMA и IEC (МЭК)?

О: Стандарты IEC (IP) и NEMA являются сходными, но не равнозначными. Требования NEMA соответствуют или превосходят требования испытаний IEC. Нормы IEC устанавливают степени защиты от доступа посторонних лиц, инородных твёрдых тел и проникания воды. Они, тем не менее, не устанавливают степени защиты от механического повреждения оборудования, риска взрыва или таких условий, как влажность, конденсация паров агрессивных жидкостей, вредное воздействие плесени и паразитов.

Стандарты NEMA предусматривают проведение испытаний в условиях воздействия агрессивных сред, обледенения, смазочных материалов и охлаждающих жидкостей. Так как тесты и оценки по различным параметрам не являются идентичными обозначениям степеней защиты по IEC, они не могут быть прямо приравнены к номерам Type по NEMA. Следующая таблица приблизительно преобразует Type NEMA в обозначения IEC.

Промышленные рабочие станции	AWS-825B	AWS-825PB	AWS-842TP6	AWS-842SPB	AWS-843HP
Тип индикатора	Аналоговая ЭЛТ	VGA TFT ЖК-дисплей	Цветной DSTN ЖК-дисплей	SVGA TFT ЖК-дисплей	
Размер (по диагонали)	15"	10.4"			
Максимальная разрешающая способность	1280×1024	640×480			800×600
Максимальное число цветов	16,7 млн.	256 К	4096		256 К
Размер точки раstra, мм	0,28	0,33 × 0,33			0,26 × 0,26
Рабочий диапазон температур	0...50°C	0...45°C			0...50°C
Мощность источника питания, Вт	260				
Объединительная плата	8 слотов шины ISA: 3 — для полноразмерных плат, 5 — для плат половинного размера	2 слота шины PCI, 4 слота шины ISA, 1 — CPU	3 слота шины PCI, 4 слота шины ISA, 1 — CPU или 8 слотов шины ISA		2 слота шины PCI, 4 слота шины ISA, 1 — CPU
Дисководы	Один 3,5" НЖМД (по заказу), один 3,5" НГМД				
Видеоплата	PCA-6653 (по заказу)	PCA-6646 (по заказу)	PCA-6653		PCA-6654LB
Клавиатура	39 рабочих клавиш, 10 функциональных, 10 программируемых клавиш для макрокоманд				

9. Промышленная рабочая станция с 10,4" SVGA ЖК-дисплеем, с активной матрицей (TFT) и объединительной платой с шиной PCI

AWS-843 представляет собой компактную промышленную рабочую станцию, удовлетворяющую самым высоким требованиям и предназначенную для эксплуатации в самых неблагоприятных условиях. небольшая глубина (всего 220 мм) позволяет легко интегрировать AWS-843 в промышленное оборудование, а три охлаждающих вентилятора обеспечивают стабильность параметров внутренней среды. Изготовленный из нержавеющей стали корпус AWS-843 обеспечивает максимальную стойкость рабочей станции к воздействию окружающей среды. Кроме того, AWS-843 оснащена цветным TFT-дисплеем с разрешением 800×600 пикселей и имеет два отсека для размещения жестких дисков.

Технические данные

- **Лицевая панель:** алюминиевая, степень защиты соответствует NEMA4 или IP65
- **Конструкция:** высокопрочное шасси из нержавеющей стали
- **Отсек для дисководов** содержит один малогабаритный 3,5" НГМД, два 3,5" НЖМД и один малогабаритный CD-ROM (CD-ROM и НЖМД устанавливаются по заказу)
- **Видеоплаты:** PCA-6653 (ISA) с установленным на плате ОЗУ 1 Мбайт; PCA-6645LB (PCI) с установленным на плате ОЗУ 2 Мбайт
- **Система охлаждения:** два вентилятора на задней панели с производительностью 82 м³/ч и один — на источнике питания
- **Мембранные клавиатуры:** одна с 60 клавишами для ввода данных, одна с 10 функциональными клавишами и 10 программируемыми функциональными клавишами макрокоманд
- **Соединитель клавиатуры:** 5-контактный соединитель типа DIN с пыленепроницаемой заглушкой
- **Индикаторы:** светодиоды включения питания и доступа к НЖМД

- **Сенсорный экран** (по заказу): аналоговый резистивный, с контроллером, подключенным через RS-232, ресурс — 35 млн. касаний
- **Диапазон рабочих температур:** 0...+50°C
- **Относительная влажность:** 5...85% @ 40°C без конденсации влаги
- **Диапазон температур хранения:** -40...+60°C
- **Относительная влажность** (в нерабочем состоянии): 5...95% без конденсации влаги
- **Габаритные размеры:** 482 × 266 × 220 мм
- **Вес:** 11,6 кг
- **Вибрация:** среднеквадратическое значение случайной вибрации (в рабочем состоянии) в диапазоне 5...500 Гц 1g
- **Нормы безопасности:** CE, FCC, VCIQ, C-UL

Пассивная объединительная плата

- PCA-6107P2: 4 ISA, 2 PCI, 1 CPU-слот
- PCA-6108C: 8 ISA-слотов

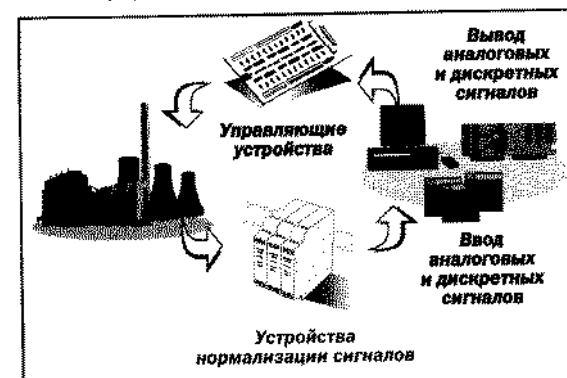
Вариант источника питания

Источник с входом переменного тока, выходная мощность 260 Вт (стандартное исполнение)

- **Входное напряжение:** 85...130 В или 180...260 В переменного тока, частота 47...63 Гц, диапазон переключаемый
- **Выходное напряжение:** +5 В @ 25 А; +12 В @ 9 А; -5 В @ 0,5 А; -12 В @ 2,0 А
- **Средняя наработка на отказ:** 100 000 ч
- **Нормы безопасности:** UL/CSA/TÜV

10. Программное обеспечение систем сбора данных и управления

Системы сбора, обработки сигналов и управления, построенные на базе IBM PC совместимых компьютеров, в настоящее время все шире используются для автоматизации различных отраслей промышленности и транспорта. В общем случае любая подобная система состоит из аппаратной и программной частей. Настоящий раздел каталога содержит описание предлагаемых фирмой Advantech аппаратных средств для сбора, обработки и анализа аналоговых (АЦП, ЦАП) и дискретных электрических сигналов, а также нормализации (приведения к стандартным диапазонам электрических величин) сигналов от первичных преобразователей (датчиков) физических величин, и средств для вывода информации из компьютера, управления исполнительными устройствами и коммутации сигналов и нагрузок.



Структура типичной системы сбора данных и управления

Программное обеспечение

Для каждого устройства имеется руководство по программированию, позволяющее работать с ним на трех уровнях. При программировании на низком уровне (языки С, Ассемблер и др.) доступ к устройствам осуществляется непосредственно через порты и регистры, что обеспечивает гибкость и эффективность, но требует очень больших затрат на разработку. При программировании на уровне драйверов возможно использование для работы с устройством готовых функций, обеспечиваемых драйверами. Вызов этих функций возможен из программ на языках высокого уровня. Наконец, при работе на уровне специальных пакетов приложений возможно создание рабочих программ для систем сбора данных и управления с использованием специальной графической среды разработки для алгоритмов управления и интерфейсов, без написания программного кода в классическом смысле. Вы можете просто «рассказать» компьютеру, что надо делать. Последний способ обеспечивает минимальное время и затраты на разработку.

Этап 1: определение фундаментальных параметров системы

Определяется назначение и область применения системы. Определяется состав данных, необходимых для работы системы, количество входных параметров. Определяется необходимая скорость сбора данных, частота дискретизации, типы входных сигналов, требования к точности измерения входных и выдаче управляющих параметров. Определяется темп работы системы и условия эксплуатации.

Этап 2: выбор технических средств

На основании анализа результатов первого этапа определяется потребность в средствах аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразования сигналов (АЦП/ЦАП), дискретного ввода-вывода, а также необходимость использования интерфейсов RS-232 и RS-485. Возможно использование устройств с шиной ISA или PCI. Выбор технических средств базируется на следующих основных критериях:

- тип и число входных и выходных каналов;
- тип аналоговых входов (дифференциальный или с общим проводом);
- разрешение АЦП/ЦАП;
- скорость обработки данных;
- программная поддержка.

Этап 3: выбор программного обеспечения

Программное обеспечение в наибольшей степени определяет пригодность системы для решения данной задачи, ее эффективность, надежность и легкость модификации. Выбор программного обеспечения базируется на следующих основных критериях:

- вид операционной системы;
- опыт и навыки пользователя в программировании;
- совместимость технических средств и программного обеспечения.

Этап 4: подбор необходимых аксессуаров

Для большинства приложений требуется использование аксессуаров, которые не входят в стандартный комплект поставки технических средств:

- периферийные устройства для расширения количества каналов в системе;
- кабели, клеммные платы, модули нормализации сигналов и т.д.

Критерии правильности выбора программного обеспечения

- включает все необходимые компоненты для разработки и исполнения приложения;
- полностью поддерживает имеющееся оборудование;
- позволяет при необходимости развивать и модифицировать приложение;
- несложно в использовании;
- имеет интерфейс, удобный для разработчика.

Составитель Добролюбов Иван Петрович

ПРОГРАММИРУЕМЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Редактор *М.Г. Девищенко*
Компьютерная верстка *В.Н. Зенина*

Подано в печать «__» _____ 2018 г. Формат 60x84 ¹/₁₆

Объем 1,5 уч.-изд. л., 18,8 усл. печ. л.

Тираж 100 экз. Изд №__ Заказ __

Отпечатано в Издательском центре НГАУ «Золотой колос»
630039, Новосибирск, ул. Добролюбова, 160, кааб. 106.
Тел./факс (383) 267-09-10. E-mail: 2134539@mail.ru