

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Автоматизация и математическое моделирование в НГК»

Конспект лекций по дисциплине

**Технологические процессы нефтегазового комплекса
как объекты автоматизации**

для студентов заочной формы обучения

Ростов–на–Дону
ДГТУ
2025

1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

1.1. Общие понятия

При описании систем автоматического управления используют математические модели: статические и динамические характеристики, дифференциальные уравнения, передаточные функции $W(p)$, частотные и переходные характеристики.

При использовании этих моделей, объект представляют в виде **звена** (блока), на который действуют входные воздействия: задающие (управляющие) сигналы X , возмущения (помехи) F , а на выходе звена имеют технологические параметры объекта Y (рис. 1.1, а).

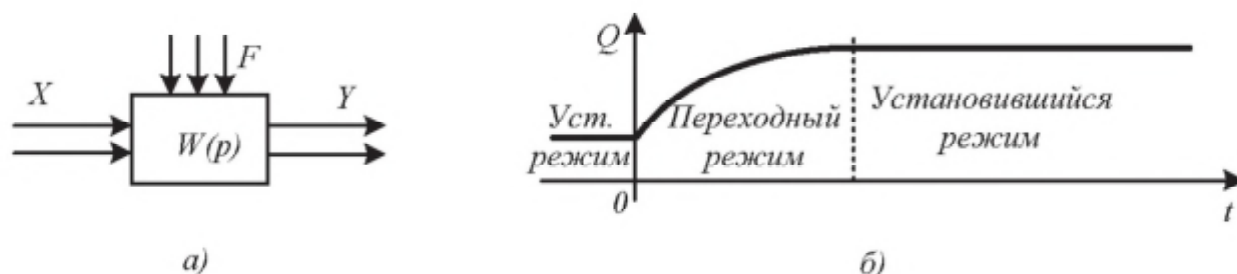


Рисунок 1.1. Иллюстрация звена (а) и режимов работы объекта (б)

Под воздействием входных величин X и F выходные параметры Y изменяются. Например, для центробежного насоса увеличение частоты вращения привода (входной величины) вызывает увеличение подачи жидкости (выходной величины); помехами для насоса будут: изменяющаяся вязкость жидкости, износ оборудования, вибрации и др.

Объекты управления могут работать в установившемся и переходном режиме (рис. 1.1, б).

Установившийся режим — это режим, при котором выходной параметр объекта управления не изменяется (или изменяется по определенному закону).

Переходный режим — это режим перехода объекта из одного установившегося режима в другой установившийся режим.

Статической характеристикой объекта называют зависимость установившегося значения выходной величины от входной величины $Y = f(X)$ (рис. 1.2, а).

Линейные статические характеристики более удобны в отличие от нелинейных, поэтому нелинейные модели обычно преобразуют к линейному виду путем **линеаризации**.

Динамической характеристикой объекта называется зависимость выходной величины от времени при различных входных воздействиях (ступенчатых, импульсных и др.).

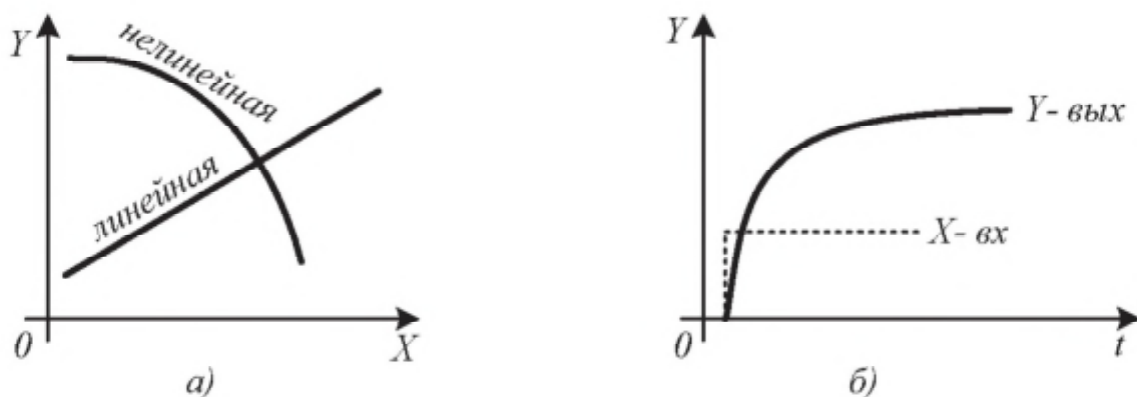


Рисунок 1.2. Примеры статических (а) и динамической (б) характеристик

Выделяют следующие **принципы автоматического управления**:

1) Принцип разомкнутого управления (разомкнутые системы автоматического управления САУ) (рис. 1.3): сигнал с задающего устройства усиливается и подается на исполнительный механизм, который воздействуя на объект управления, изменяет выходной сигнал Y .

Рассмотрим разомкнутую систему на примере емкости для нагрева жидкости. Пусть система содержит элементы:

- объект управления – емкость (резервуар) с жидкостью;
- исполнительный механизм – нагревательный электрический элемент;
- выходной параметр – температура жидкости t° ;
- входной параметр – ток нагревательного элемента I .

При увеличении тока I нагревательного элемента, температура жидкости t° увеличивается, и наоборот. Но при неизменных параметрах работы нагревателя, то есть при фиксированном токе ($I = const$), температура жидкости t° может изменяться (отклоняться от заданной) под воздействием помех: температуры окружающей среды. Возникнет ошибка управления – **статическая ошибка** ε – отклонение фактической температуры жидкости от заданного значения.

Недостаток разомкнутых систем состоит в том, что система обеспечивает точное управление только при соответствии всех параметров системы управления и объекта управления их расчетным величинам.



Рисунок 1.3. Разомкнутая система автоматического управления

2) Принцип компенсации (управление по возмущению).

В системах автоматического управления по возмущению измеряют возмущающие воздействия и при их отклонении от расчетных (нормальных) значений корректируют управляющий сигнал (рис. 1.4).

В настоящее время системы управления, реализующие принцип компенсации не нашли широкого распространения, так как невозможно оценить все возмущения, действующие на объект и достичь высокой точности управления.

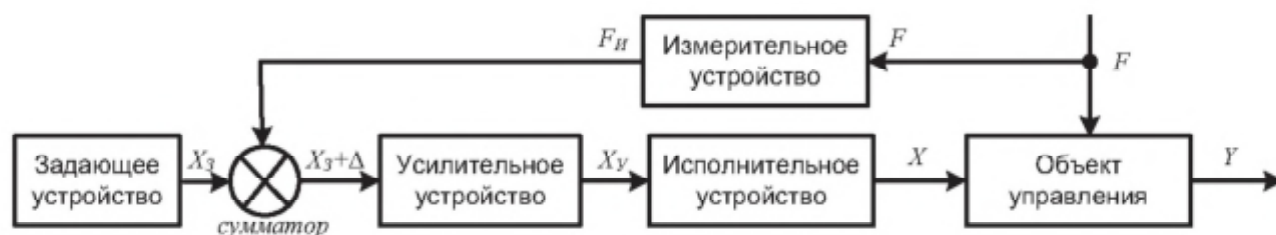


Рисунок 1.4. Система автоматического управления, реализующая принцип компенсации

3) Управление по замкнутой схеме (замкнутые САУ) (рис. 1.5).

В замкнутых САУ выходной параметр измеряется и сравнивается с заданным значением. При несоответствии контролируемого параметра Y заданному X_3 вводится коррективка $\Delta X = X_3 - X_{И}$ в управляющий сигнал. Таким образом, управляющий сигнал формируется в функции отклонения выходного параметра.

Замкнутые системы обеспечивают высокую точность управления, так как в фактическом значении регулируемой величины заложены данные всех возмущений. Замкнутые САУ называются **системами автоматического регулирования (САР)**.

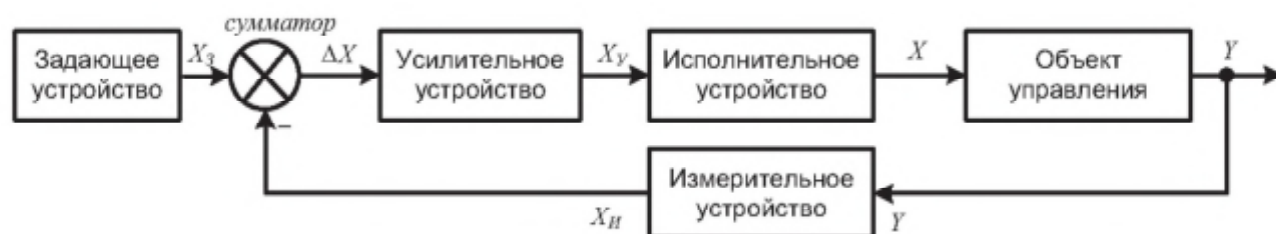


Рисунок 1.5. Замкнутая система автоматического управления

Принцип замкнутого управления (по отклонению) осуществляется замыканием цепи **обратной связи (ОС)**. Обратная связь – это канал связи от выхода объекта управления до входа системы.

Как правило, в системах регулирования обратная связь отрицательная (см. рис. 1.5), при которой на выходе сумматора появляется сигнал разности заданного X_3 и фактического значения $X_{И}$. Чем больше ΔX , тем сильнее система управления воздействует на объект.

Замкнутые САУ получили самое широкое распространение.

Недостатком замкнутых систем управления является их повышенная колебательность, то есть длительное регулирование «больше – меньше» от заданного значения.

4) **Комбинированные САУ** осуществляют контроль возмущающих воздействий и выходного параметра, и на основании этих измерений формируют управляющее воздействие. Таким образом, используются принцип компенсации и принцип замкнутых систем.

1.2. Классификация САУ

Классификация систем автоматического управления представлена в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Классификация САУ

Признак классификации	Классификация
Наличие или отсутствие дополнительных источников энергии	Выделяют системы прямого и косвенного управления . Системы прямого управления – это системы управления, для которых не требуется дополнительные источники энергии, и чувствительный элемент непосредственно воздействует на регулирующее устройство. Системы косвенного управления – это системы управления, в которых используются дополнительные источники энергии (например, усилители)
Характер сигналов, циркулирующих в системе	Аналоговые (непрерывные), дискретные (цифровые) и дискретно-непрерывные (гибридные) системы управления
Цель управления	Системы стабилизации, системы программного регулирования и следящие системы . Системы стабилизации – это системы управления, которые обеспечивают стабилизацию (поддержание требуемого значения) выходной величины в соответствии с задающим воздействием. Системы программного регулирования – это системы, в которых задающее воздействие изменяется по заданной программе. Следящие системы – это системы обеспечивающие изменение регулируемого параметра по закону, который заранее неизвестен (например, манипуляторы)
По величине ошибки управления ε	Системы статические и астатические . Статические системы по окончании процесса регулирования имеют ошибку, равную некоторой постоянной величине, называемую статической ошибкой ε . Астатические системы по окончании процесса регулирования не имеют ошибку управления ($\varepsilon = 0$)
По числу замкнутых контуров регулирования САУ	Одноконтурные и многоконтурные системы

Помимо указанных типов САУ выделяют **стационарные и нестационарные системы** (по виду зависимости коэффициентов дифференциальных уравнений от времени); бывают **обыкновенные и самонастраивающиеся (адаптивные) системы** (по возможности изменения параметров управляющих устройств).

1.3. Математическое описание САУ

Для описания САУ используют математические модели – дифференциальные (интегральные, разностные) уравнения, описывающие движение системы, это так называемые **уравнения динамики**.

Например, уравнение динамики 3-го порядка имеет вид:

$$a_0 y''' + a_1 y'' + a_2 y' + a_3 y = b_0 x''' + b_1 x'' + b_2 x' + b_3 x \quad (1.1)$$

или

$$a_0 \frac{d^3 y}{dt^3} + a_1 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_2 \frac{dy}{dt} + a_3 \cdot y(t) = b_0 \frac{d^3 x}{dt^3} + b_1 \frac{d^2 x}{dt^2} + b_2 \frac{dx}{dt} + b_3 \cdot x(t),$$

где x – входной параметр;

y – выходной параметр;

a_i, b_i – коэффициенты.

Если принять все производные равными нулю получим **уравнение статики**: $a_3 \cdot y = b_3 \cdot x$, показывающее взаимосвязь выходного и входного параметра в установившемся режиме.

Дифференциальные уравнения элементов и всей САУ составляются в соответствии с физическими законами их функционирования.

Для описания САУ применяют передаточные функции, получаемые при помощи **преобразования Лапласа**.

Преобразование Лапласа заключается в том, что исходной функции времени $x(t)$ устанавливается в однозначное соответствие функция-изображение $\tilde{x}(s)$, где s – оператор Лапласа (также оператор Лапласа обозначают символом p). Исходная функция параметра во времени $x(t)$ называется **оригиналом**, а функция $\tilde{x}(s)$ – **изображением**.

Изображение определяется через оригинал по формуле:

$$\tilde{X}(s) = \int_0^{\infty} x(t) e^{-st} dt.$$

При использовании преобразования Лапласа используют теоремы, которые даны в литературе [7]. Изображения некоторых функций приведены в табл. 1.2.

Например, производная $\frac{d}{dt}$ заменяется оператором Лапласа s или p , то есть

$$\frac{dQ}{dt} \rightarrow s \cdot \tilde{Q}(s).$$

Таблица 1.2

Изображения функций

Оригинал функции	Изображение функции
A	$\frac{A}{s}$
$\frac{df(t)}{dt}$	$sF(s) - f(0)$
$\int_0^t f(t)dt$	$\frac{F(s)}{s}$
e^{-at}	$\frac{1}{s+a}$
te^{-at}	$\frac{1}{(s+a)^2}$

Пример.

Процесс нагрева жидкости в котле описывается дифференциальным уравнением:

$$T \frac{d\theta}{dt} + \theta(t) = J(t),$$

где J – ток, потребляемый электронагревателем (входной параметр);

θ – температура нагреваемой жидкости (выходная величина);

T – постоянная времени, характеризующая инертность процесса нагрева (определяется техническими характеристиками).

Применяя преобразование Лапласа, получим изображение данного уравнения: $T \cdot s \cdot \tilde{\theta}(s) + \tilde{\theta}(s) = \tilde{J}(s)$, здесь знаком «~» отмечены изображения входной J и выходной θ величины (то есть данные параметры указаны не в функции времени).

Пример.

Получим изображение дифференциального уравнения

$$y(t) = T_1 \frac{d^2 x}{dt^2} + x(t) + T_2 \frac{df}{dt}.$$

По данному уравнению видно, что выходная величина y объекта зависит от двух входных параметров x и f . Изображение уравнения примет вид:

$$\tilde{y}(s) = T_1 \cdot s^2 \cdot \tilde{x}(s) + \tilde{x}(s) + T_2 \cdot s \cdot \tilde{f}(s).$$

Передаточная функция.

Для описания, анализа и синтеза САУ используют **передаточные функции**.

Передаточная функция системы (звена) $W(s)$ это отношение изображения выходной величины к изображению входной величины в преобразовании Лапласа при нулевых начальных условиях:

$$W(s) = \frac{\tilde{y}(s)}{\tilde{x}(s)}. \quad (1.2)$$

Пусть система описывается дифференциальным уравнением

$$a_0 y''' + a_1 y'' + a_2 y' + a_3 y = b_0 x''' + b_1 x'' + b_2 x' + b_3 x.$$

Примем нулевые начальные условия, преобразуем уравнение к изображению по Лапласу, получим:

$$a_0 \tilde{y} \cdot s^3 + a_1 \tilde{y} \cdot s^2 + a_2 \tilde{y} \cdot s + a_3 \tilde{y} = b_0 \tilde{x} \cdot s^3 + b_1 \tilde{x} \cdot s^2 + b_2 \tilde{x} \cdot s + b_3 \tilde{x}.$$

Вынесем за скобки изображения выходного \tilde{y} и входного \tilde{x} параметров:

$$\tilde{y} (a_0 \cdot s^3 + a_1 \cdot s^2 + a_2 \cdot s + a_3) = \tilde{x} (b_0 \cdot s^3 + b_1 \cdot s^2 + b_2 \cdot s + b_3).$$

Обозначим выражения в скобках соответственно $A(s)$ и $B(s)$:

$$\tilde{y} \cdot A(s) = \tilde{x} \cdot B(s).$$

Преобразуем к виду: $\frac{\tilde{y}}{\tilde{x}} = \frac{B(s)}{A(s)}$. Полученное выражение есть передаточная

функция, так как получено отношение изображения выходной величины $\tilde{y}(s)$ к изображению входной величины $\tilde{x}(s)$:

$$W(p) = \frac{\tilde{y}(s)}{\tilde{x}(s)} = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_0 \cdot s^3 + b_1 \cdot s^2 + b_2 \cdot s + b_3}{a_0 \cdot s^3 + a_1 \cdot s^2 + a_2 \cdot s + a_3}.$$

Пример. Для системы, описываемой дифференциальным уравнением $0,01 \frac{dy}{dt} + y(t) = 5x(t)$ (y – выходной параметр, x – входной параметр) после преобразования Лапласа получаем: $0,01s \cdot \tilde{y}(s) + \tilde{y}(s) = 5\tilde{x}(s)$.

Упростим: $\tilde{y}(s) \cdot (0,01s + 1) = 5 \cdot \tilde{x}(s)$.

Откуда передаточная функция $W(s) = \frac{\tilde{y}(s)}{\tilde{x}(s)} = \frac{5}{0,01s + 1}$.

Так как САУ может состоять из нескольких элементов, удобно использовать структурные схемы, показывающие взаимосвязи между звеньями.

Структурной схемой называется схема системы автоматического управления, представленная в виде соединения звеньев, описанных передаточными функциями.

1.4. Преобразование структурных схем САУ

При анализе и синтезе САУ ее схему представляют не в виде соединения функциональных блоков (элементов), а в виде **структурной схемы** – цепи соединения динамических звеньев.

Динамическое звено – это математическая модель объекта или его части, записанная в виде дифференциального уравнения или передаточной функции.

Любую систему можно преобразовать к одному звену, эквивалентно преобразовывающему сигнал и имеющему все характеристики, которые вводились для отдельных динамических звеньев.

Рассмотрим три основных вида соединения звеньев (рис. 1.6):

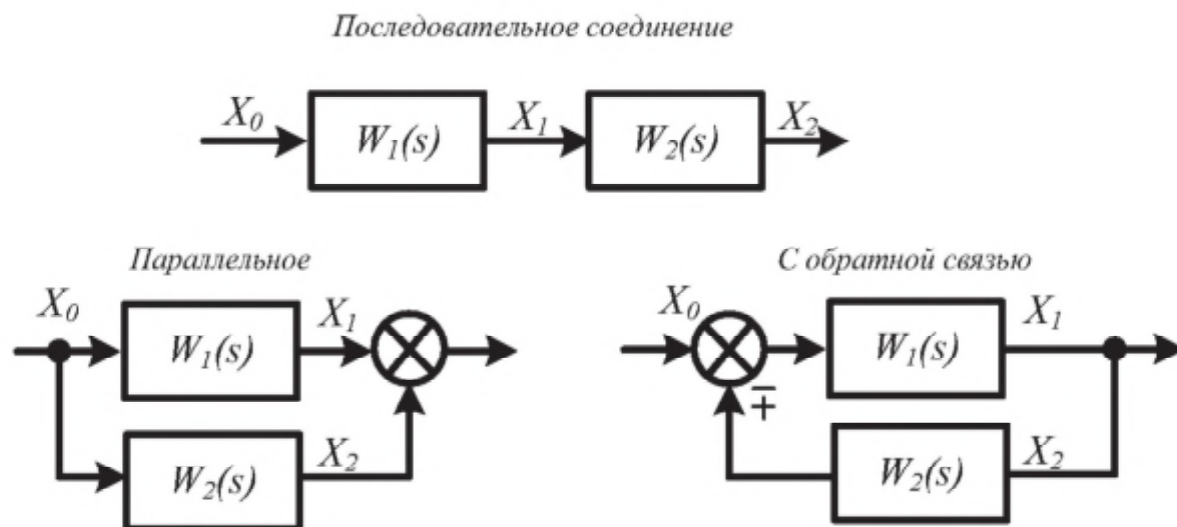


Рисунок 1.6. Виды соединения звеньев

Общая передаточная функции САУ при различных видах соединения определяется по формулам:

– при последовательном соединении звеньев:

$$W(s) = W_1(s) \cdot W_2(s) \cdot \dots \cdot W_n(s); \quad (1.3)$$

– при параллельном соединении звеньев:

$$W(s) = W_1(s) + W_2(s) + \dots + W_n(s); \quad (1.4)$$

– при встречно-параллельном соединении (с обратной связью):

$$W(s) = \frac{W_1(s)}{1 \mp W_1(s)W_2(s)}, \quad (1.5)$$

где $W_1(s)$ – передаточная функция главной цепи САУ;

$W_2(s)$ – передаточная функция звена в обратной связи.

Для получения общей передаточной функции сложной многосвязной САУ в структурной схеме выделяют отдельные участки с типовым соединением звеньев и преобразовывают их к одному звену. Если структура схемы оказывается очень сложной (необходимо перенести сумматор или точку отвода обратной связи), то используют правила преобразования структурных схем САУ [6, 7].

Пример. Дана структурная схема САУ (рис. 1.7, а). Требуется получить общую передаточную функцию системы.

Звенья $W_1(s)$ и $W_2(s)$ соединены встречно-параллельно, то передаточная функция для участка имеет вид: $W_{12}(s) = \frac{W_1(s)}{1 + W_2(s) \cdot W_1(s)}$.

Звенья $W_3(s)$ и $W_4(s)$ соединены параллельно, то их общая передаточная функция: $W_{34}(s) = W_3(s) + W_4(s)$.

После преобразования схема примет вид рис. 1.7, б).

Звенья $W_{12}(s)$ и $W_{34}(s)$ соединены последовательно, и их эквивалентная передаточная функция САУ равна $W(s) = W_{12}(s) \cdot W_{34}(s)$ (рис. 1.7, в).

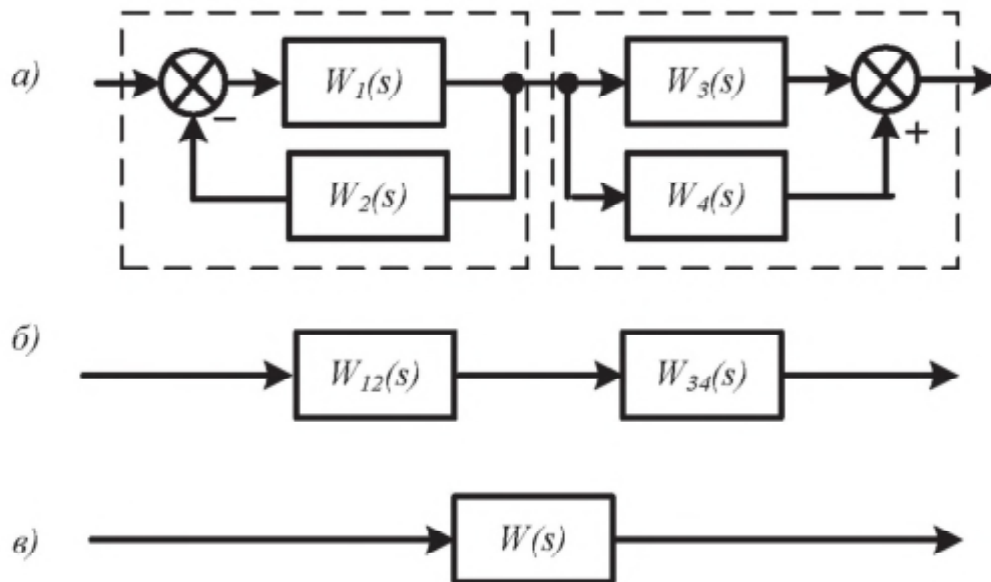


Рисунок 1.7. Структурная схема САУ

1.5. Временные характеристики

Временные характеристики описывают изменения выходного параметра в переходном процессе, к ним относятся переходная и импульсная характеристики.

Переходным процессом называется переход системы из одного установившегося режима в другой установившийся режим при различных входных воздействиях. Переходные процессы изображаются графиками в виде кривой $y(t)$, и характеризуют динамические свойства системы.

Так как входные сигналы на объект управления могут быть различными, то и переходные характеристики будут разные. Типовые входные сигналы изображены на рис. 1.8.

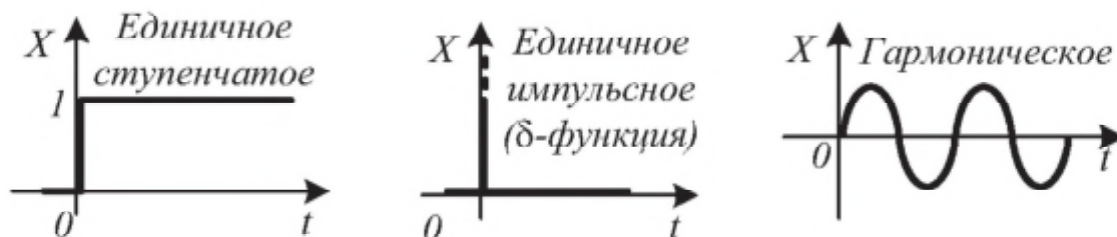


Рисунок 1.8. Виды входных сигналов (воздействий)

В зависимости от вида входного воздействия выделяют следующие типы переходных характеристик:

Переходной характеристикой $h(t)$ называется реакция объекта на единичное ступенчатое воздействие при нулевых начальных условиях (рис. 1.9, а).

Импульсной характеристикой (весовой функцией) $\varpi(t)$ называется реакция объекта на входной импульс (δ -функцию) при нулевых начальных условиях (рис. 1.9, б).

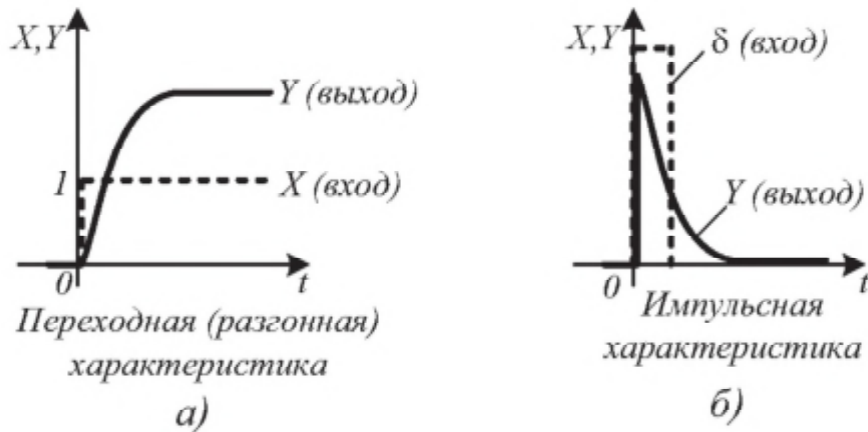


Рисунок 1.9. Примеры переходной и импульсной характеристик

1.6. Частотные характеристики динамических звеньев

Если на вход объекта подать синусоидальный сигнал $x(t) = X_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_X)$, то на выходе установится также синусоидальный сигнал $y(t) = Y_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_Y)$, изменяющийся с той же частотой ω , но имеющий другую амплитуду Y_m и фазу φ_Y .

По рис. 1.10 видно, что при подаче на вход системы сигнала с частотой ω_1 амплитуды входного и выходного сигналов равны $X_m = Y_m$, а при частоте ω_2 амплитуда выходного сигнала больше в 2 раза. Также при разных частотах входного сигнала различаются начальные фазы выходных сигналов (-90° и -30°).

При анализе САУ используют следующие параметры:

Модуль $A(\omega) = W(\omega) = |W(j\omega)|$ (амплитуда частотной функции) – это отношение амплитуды выходного сигнала к амплитуде входного сигнала:

$$A(\omega) = \frac{Y_m(\omega)}{X_m(\omega)}.$$

Фаза частотной функции $\varphi(\omega)$ – это сдвиг фазы между выходным и входным сигналом:

$$\varphi(\omega) = \varphi_Y(\omega) - \varphi_X(\omega).$$

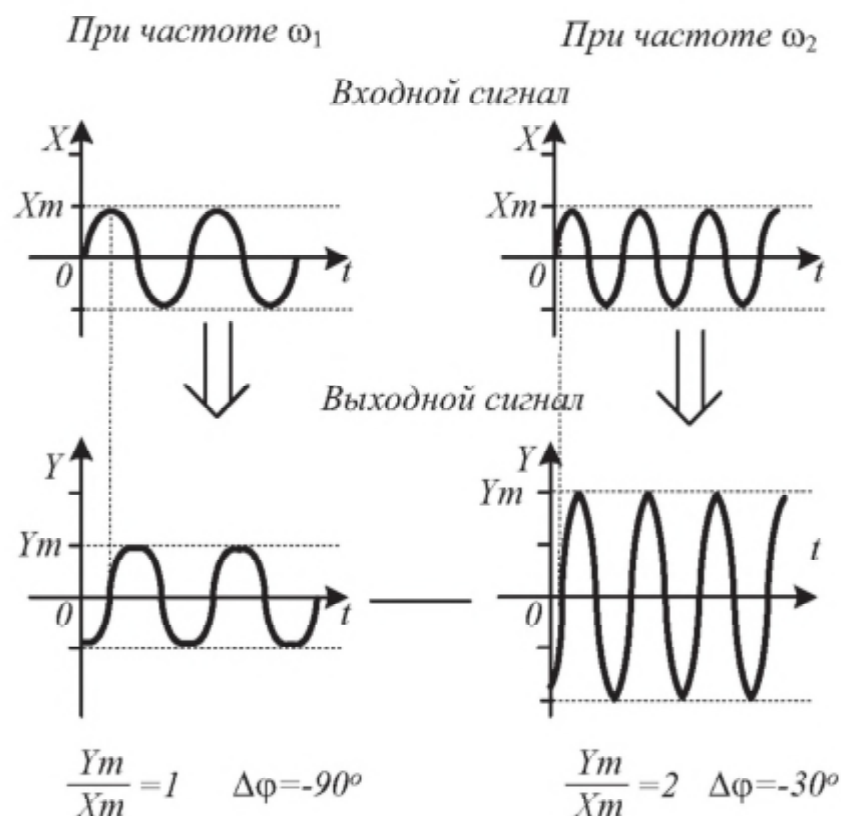


Рисунок 1.10. Входной и выходной гармонический сигналы объекта

Так как амплитуда и фаза зависят от частоты входного сигнала, то выделяют:

– **амплитудно-частотную характеристику (АЧХ)** – зависимость амплитуды частотной функции (модуля) $A(\omega) = \frac{y(\omega)}{x(\omega)}$ системы от частоты ω сигнала в

установившемся режиме при подаче на вход гармонического воздействия (или зависимость отношения амплитуды выходного сигнала к амплитуде входного сигнала от частоты);

– **фазовую частотную характеристику (ФЧХ)** – зависимость фазы $\varphi(\omega)$ частотной функции системы от частоты ω сигнала в установившемся режиме при подаче на вход гармонического воздействия (или зависимость фазового сдвига $\Delta\varphi = \varphi(\omega) = \varphi_Y(\omega) - \varphi_X(\omega)$ между входным и выходным сигналом от частоты);

– **амплитудно-фазовую частотную характеристику (АФЧХ)** – зависимость амплитуды $A(\omega) = \frac{y(\omega)}{x(\omega)}$ и фазы $\varphi(\omega) = \varphi_Y(\omega) - \varphi_X(\omega)$ частотной функции от частоты ω сигнала в установившемся режиме при подаче на вход системы гармонического воздействия.

Алгоритм построения частотных функций.

1) Получаем частотную функцию. В передаточной функции системы заменяют $s \rightarrow j\omega$ и полученную функцию представляют как сумму вещественной и мнимой части:

$$W(s)|_{s=j\omega} = W(j\omega) = \frac{B(j\omega)}{A(j\omega)} = U(\omega) + jV(\omega),$$

где функция $U(\omega)$ – вещественная частотная характеристика;

функция $V(\omega)$ – мнимая частотная характеристика.

2) Определяем выражения АЧХ и ФЧХ по формулам:

$$A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}, \quad (1.6)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)}. \quad (1.7)$$

3) Строим графики АЧХ и ФЧХ по точкам при изменении частоты ω от 0 до ∞ .

4) Строим график АФЧХ – годограф – геометрическое место точек конца вектора $W(j\omega)$ на комплексной плоскости при изменении частоты от 0 до ∞ [7].

Пример. Построим частотные характеристики для апериодического звена с передаточной функцией $W(s) = \frac{k}{1+Ts}$, где $k = 5$; $T = 0,1$ с.

1) Делаем замену $s = j\omega$ и упрощаем:

$$W(s \rightarrow j\omega) = \frac{k}{1+jT\omega} = \frac{k(1-jT\omega)}{(1+jT\omega)(1-jT\omega)} = \frac{k(1-jT\omega)}{1+T^2\omega^2} = \frac{k}{1+T^2\omega^2} + j \frac{-kT\omega}{1+T^2\omega^2}.$$

Отсюда вещественная и мнимая части соответственно равны:

$$U(\omega) = \frac{k}{1+T^2\omega^2}; \quad V(\omega) = -\frac{kT\omega}{1+T^2\omega^2}.$$

Амплитудно-частотная функция звена:

$$A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)} = \frac{k}{\sqrt{1+T^2\omega^2}} = \frac{5}{\sqrt{1+0,1^2\omega^2}}.$$

Фазовая частотная функция звена:

$$\varphi(\omega) = \frac{V(\omega)}{U(\omega)} = -\arctg(T\omega) = -\arctg(0,1 \cdot \omega).$$

Для построения частотных функций рассчитаем точки $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ при изменении частоты ω от 0 до ∞ .

Таблица 1.3

Расчет частотных характеристик

ω	0	5	10	20	50	100	∞
$A(\omega)$	5	4,47	3,54	2,24	0,98	0,50	0
$\varphi(\omega)^\circ$	0	-26	-45	-63,47	-79	-84	-90

Графики характеристик представлены на рис. 1.11.

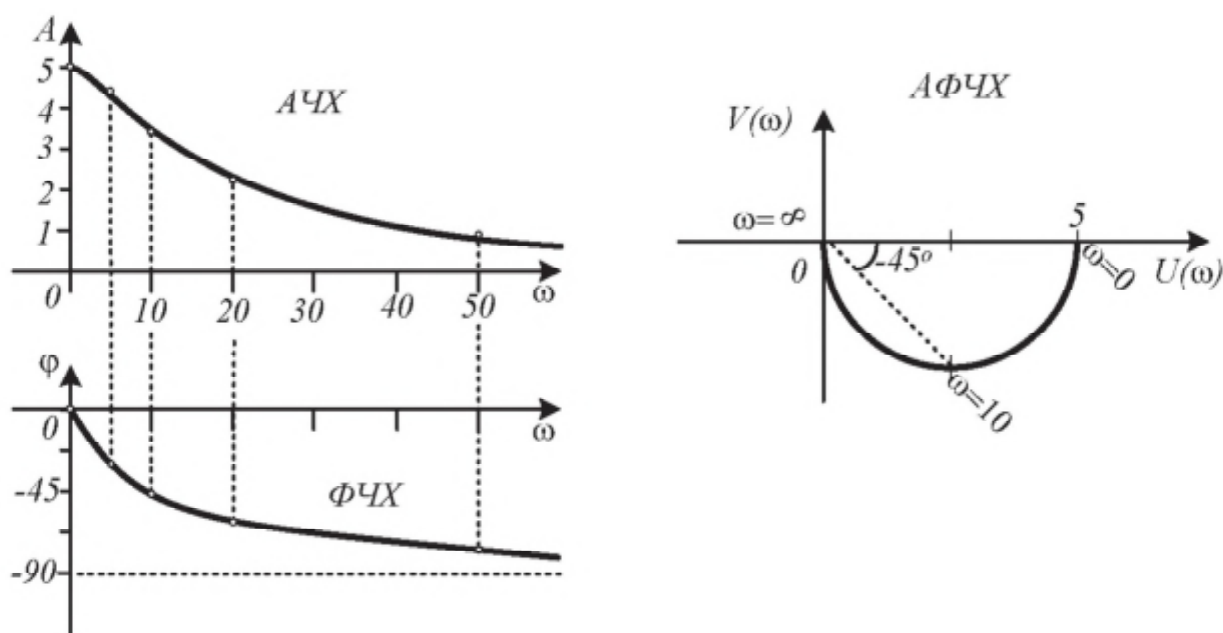


Рисунок 1.11. Частотные характеристики апериодического звена

1.7. Логарифмические частотные характеристики

При расчетах САУ удобно использовать логарифмические амплитудно-частотные (ЛАЧХ) и логарифмические фазовые частотные (ЛФЧХ) характеристики. При построении логарифмических характеристик по горизонтальной оси откладывают частоту в логарифмическом масштабе ($10^0, 10^1, 10^2, 10^3, 10^4, \dots$) – это позволяет охватить значительный диапазон частот. ЛАЧХ и ЛФЧХ наиболее удобны для решения задач анализа и синтеза систем, по сравнению с другими частотными характеристиками.

Для оси абсцисс ω единицей измерения является декада или октава. Декада – соответствует десятикратному изменению частоты (1, 10, 100, 1000 и т. д.). Октава – соответствует двукратному изменению частоты (1, 2, 4, 8).

Ординатой логарифмической амплитудно-частотной характеристики является величина $L(\omega) = 20 \cdot \lg(W(\omega))$ в децибелах (дБ). В точке пересечения графика с осью абсцисс модуль (амплитуда) $A(\omega) = W(\omega) = 1$.

Для ЛФЧХ фазу откладывают по оси ординат в радианах или угловых градусах.

Пример асимптотической ЛАЧХ и ЛФЧХ для звена с передаточной функцией $W(\omega) = 1/(0,01s + 1)$ представлен на рис. 1.12.

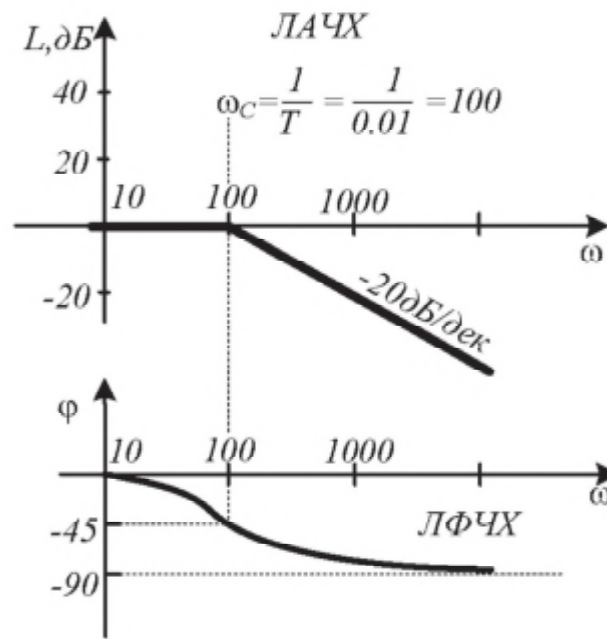


Рисунок 1.12. Пример ЛАЧХ и ЛФЧХ апериодического звена

1.8. Типовые динамические звенья

Динамическим звеном – называется математическая модель элемента или его части, записанная в виде передаточной функции или дифференциального уравнения.

В теории автоматического управления при описании САУ используют **типовые динамические звенья** (динамические звенья, которые описываются дифференциальными уравнениями не выше второго порядка).

Различают следующие типы звеньев [6, 7]:

1. Усилительное (пропорциональное, безинерционное) звено

$$W(s) = k.$$

2. Идеальное дифференцирующее звено

$$W(s) = ks.$$

3. Интегрирующее звено

$$W(s) = \frac{k}{s} \text{ или } W(s) = \frac{1}{Ts}.$$

4. Апериодическое (инерционное) звено первого порядка

$$W(s) = \frac{k}{Ts + 1}.$$

5. Звено второго порядка

$$W(s) = \frac{k}{T^2 s^2 + 2\zeta T s + 1},$$

а) при $0 < \zeta < 1$ – колебательное звено;

б) при $\zeta > 1$ – апериодическое звено второго порядка;

в) при $\zeta = 0$ – консервативное звено.

6. Форсирующее звено первого порядка

$$W(s) = k(Ts + 1).$$

7. Форсирующее звено второго порядка

$$W(s) = k(T^2 s^2 + 2\zeta Ts + 1).$$

8. Звено чистого запаздывания

$$W(s) = e^{-\tau s}.$$

1.8.1. Пропорциональное (усилительное) звено

К такому типу звеньев относятся устройства, для которых выходная величина пропорциональна входной величине в любой момент времени. На рис. 1.13, а представлен график переходной характеристики пропорционального звена, который показывает, что при изменении входного сигнала на выходе имеем сигнал в k -раз больше. Входная и выходная величины связаны зависимостью $y(t) = kx(t)$.

Передаточная функция звена:

$$W(s) = k,$$

где k – коэффициент передачи (усиления) звена.

Модуль (амплитуда) частотной характеристики определяется коэффициентом усиления $W(\omega) = k$, фаза равна нулю $\varphi(\omega) = 0$.

Годограф звена представляет точку на комплексной плоскости, которая расположена на горизонтальной оси (действительных величин) на расстоянии равном k .

Аналитическое выражение для ЛАЧХ: $L(\omega) = 20 \cdot \lg k$ (рис. 1.13, б). Фазовая характеристика совпадает с осью частот.

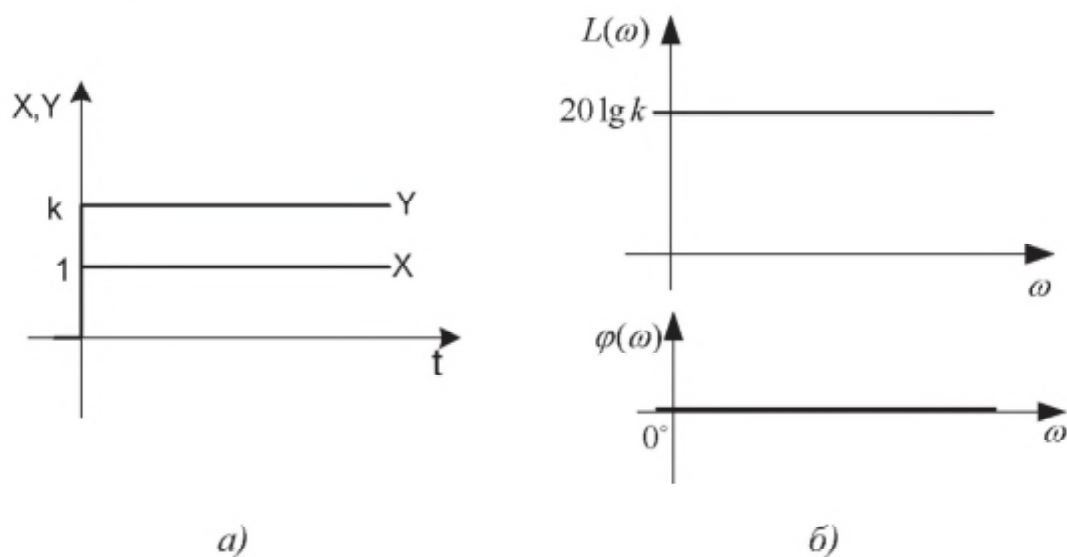


Рисунок 1.13. Переходная характеристика, ЛАЧХ и ЛФЧХ пропорционального звена

1.8.2. Аperiodическое (инерционное) звено

Для аperiodического (инерционного) звена выходной y и входной x параметры связаны дифференциальным уравнением вида

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

где T – постоянная времени (динамическая характеристика звена, от которой зависит время переходного процесса);

k – коэффициент усиления звена.

На рис. 1.14 представлена переходная характеристика и дан пример инерционного звена.

Передаточная функция звена имеет вид:

$$W(s) = \frac{k}{Ts + 1}.$$

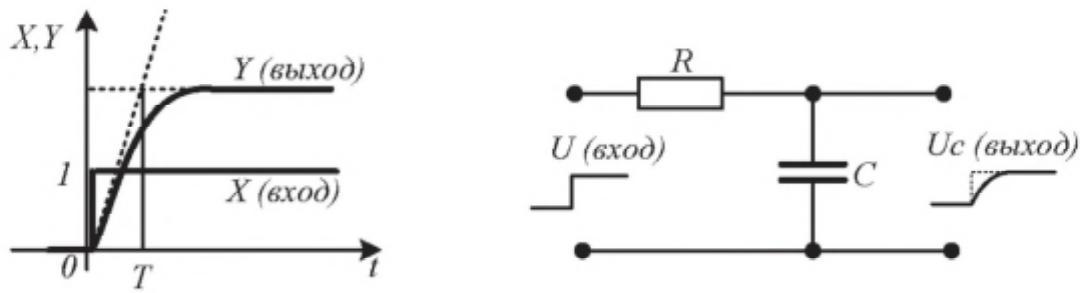


Рисунок 1.14. Переходная характеристика и пример аperiodического звена

Выражения для амплитудной и фазовой частотной характеристик аperiodического звена следующие:

$$A(\omega) = W(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)} = \frac{k}{\sqrt{1 + T^2 \omega^2}}; \quad (*)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg\left(\frac{V(\omega)}{U(\omega)}\right) = -\arctg(\omega T). \quad (**)$$

Вид графика АФЧХ представлен на рис. 1.15, а – годограф описывает кривую, представляющую собой полуокружность.

Аналитическое выражение для ЛАЧХ имеет вид:

$$L = 20 \cdot \lg W(\omega) = 20 \cdot \lg k - 20 \cdot \lg \sqrt{1 + \omega^2 T^2}.$$

ЛАЧХ состоит из двух слагаемых:

$$L_1 = 20 \cdot \lg k \text{ и } L_2 = -20 \cdot \lg \sqrt{1 + \omega^2 T^2}.$$

Составляющая L_1 не зависит от частоты. Поэтому изображается прямой, параллельной оси абсцисс с ординатой $(20 \cdot \lg k)$ (рис. 1.15, б).

Для построения участка графика второго слагаемого L_2 плавную кривую $L_2 = -20 \cdot \lg \sqrt{1 + \omega^2 T^2}$ заменяют асимптотической прямой. В области низких

частот $\omega T < 1$ величиной $\omega^2 T^2$ пренебрегают по сравнению с единицей, то $L_2 \approx 0$. В области высоких частот $L_2 \approx -20 \lg \omega - 20 \lg T$.

Сложением L_1 и L_2 получают итоговый график, который имеет точку сопряжения $\omega_c = \frac{1}{T}$. Определение углового коэффициента для прямой после ω_c ведется для декады и для апериодического звена он составляет -20 дБ/дек. Полученная ЛАЧХ называется асимптотической (рис. 1.15, б).

Аналитическое выражение для ЛФЧХ $\varphi = -\arctg(\omega T)$. На низких частотах (от 0 до ω_c) инерционное звено не вносит заметного сдвига фаз, на высоких частотах (более частоты среза ω_{cp}) звено вносит отставание по фазе $\approx -90^\circ$. При сопрягающей частоте $\omega_c = \frac{1}{T}$ сдвиг фазы равен $\varphi(\omega_c) = -\frac{\pi}{4} = -45^\circ$.

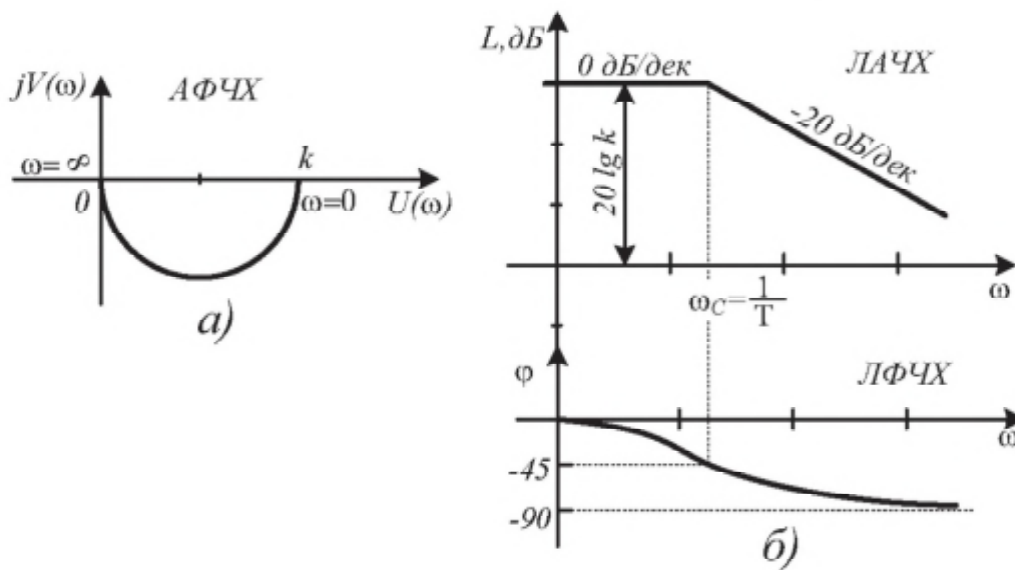


Рисунок 1.15. Частотные характеристики апериодического звена

Пример. Дан график изменения частоты вращения электродвигателя при включении (разгонная характеристика представлена на рис. 1.16, а). Построим АФЧХ и логарифмические частотные характеристики для полученного динамического звена.

Передаточная функция, определенная по разгонной характеристике, имеет вид

$$W(s) = \frac{1000}{0,05s + 1},$$

где $T = 0,05$ с – постоянная времени;

$k = 1000$ – коэффициент передачи звена.

Координаты АФЧХ (амплитуды и фазы при изменении частоты от $\omega = 0$ до $\omega = \infty$) рассчитываем по формулам (*) и (**):

$$A(\omega) = \frac{1000}{\sqrt{1 + 0,05^2 \omega^2}};$$

$$\varphi(\omega) = -\arctg(\omega \cdot 0,05).$$

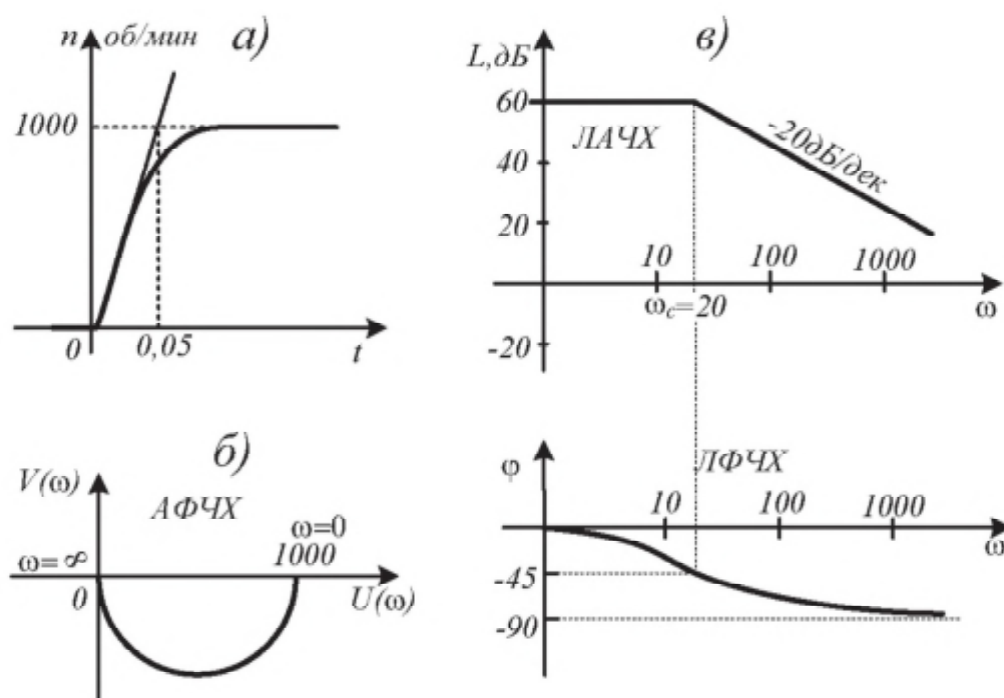


Рисунок 1.16. Характеристики аperiodического звена

Результаты расчетов сведены в табл. 1.4. График АФЧХ представлен на рис. 1.16, б.

Таблица 1.4

Координаты для построения АФЧХ

ω	0	20	40	60	80	100	140	180	∞
$A(\omega)$	1000	707	447	316	243	196	141	110	0
$\varphi(\omega)$	0°	-45°	-63°	-72°	-76°	-79°	-82°	-84°	-90°

Для построения асимптотической ЛАЧХ (рис. 1.16, в) определяем величины:

– ординату низкочастотного участка

$$20 \cdot \lg k = 20 \cdot \lg 1000 = 20 \cdot 3 = 60 \text{ дБ};$$

– частоту сопряжения

$$\omega_c = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,05} = 20 \text{ рад/с};$$

– наклон высокочастотного участка -20 дБ/дек.

ЛФЧХ строим по координатам, рассчитанным по формуле (**).

1.8.3. Интегрирующее звено

Интегрирующим называется звено, если связь между выходом и входом звена определяются уравнением вида $y(t) = k \int_0^{\infty} x(t) dt$. Переходная характеристика интегрирующего звена представлена на рис. 1.17, а.

Передаточная функция звена:

$$W(s) = \frac{k}{s} \text{ или } W(s) = \frac{1}{Ts},$$

то есть $T = 1/k$.

Годограф представляет собой прямую, которая совпадает с осью отрицательных мнимых величин. Амплитудно-частотная характеристика звена описывается выражением $A(\omega) = W(\omega) = \frac{k}{\omega}$. Аналитическое выражение для ЛАЧХ: $L = 20 \cdot \lg W(\omega) = -20 \cdot \lg(\omega T)$. ЛАЧХ представляет собой прямую, пересекающуюся с осью абсцисс на частоте среза $\omega_c = 1/T = k$. Наклон прямой равен -20 дБ/дек. Фазовый угол на всех частотах неизменный $\varphi = -\pi/2 = -90^\circ$ (рис. 1.17, б).

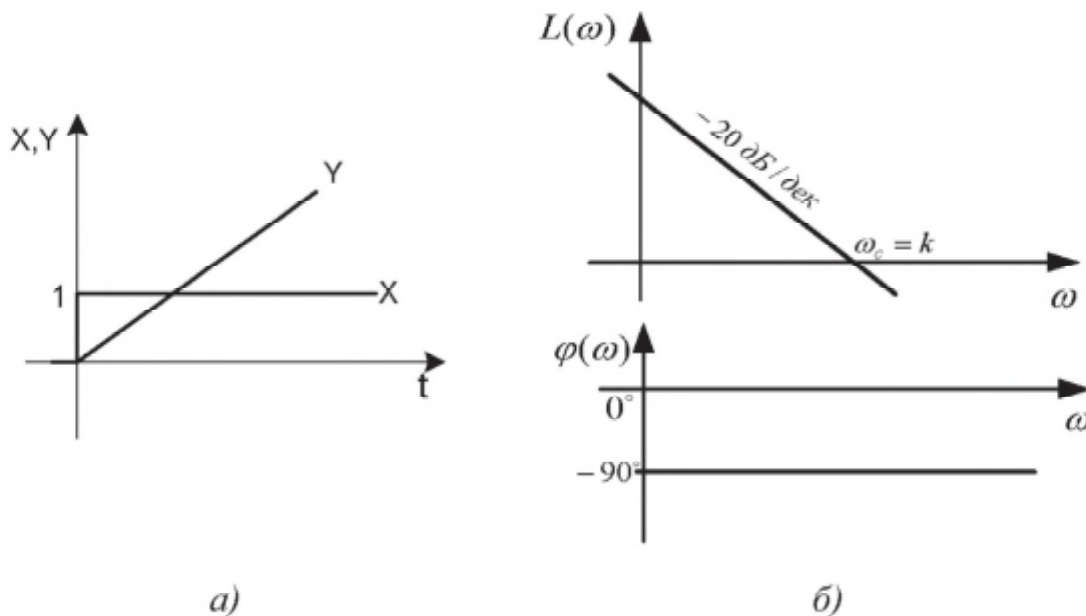


Рисунок 1.17. Характеристики интегрирующего звена

Пример.

Переходная характеристика для поршня (рис. 1.18, б) представлена на рис. 1.18, а, определите передаточную функцию звена.

Определим коэффициент передачи звена:

$$k = \frac{tg(\alpha)}{F} = \frac{\Delta x / \Delta t}{1} = \frac{5}{8} = 0,625.$$

Тогда передаточная функция звена имеет вид:

$$W(s) = \frac{k}{s} = \frac{0,625}{s}.$$

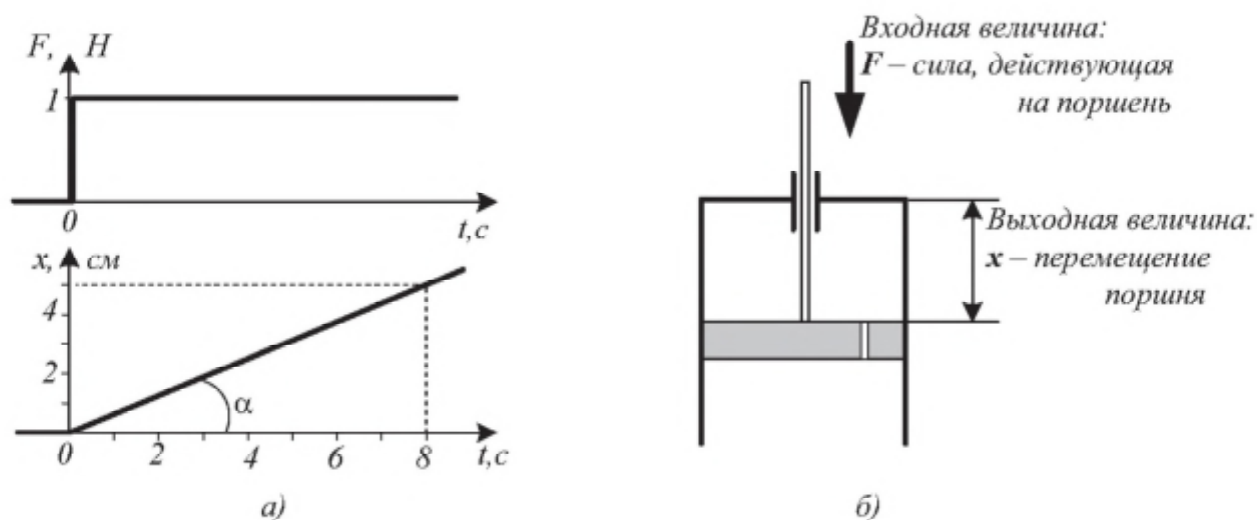


Рисунок 1.18. Переходная характеристика (а) и пример (б) интегрирующего звена

1.8.4. Колебательное звено

Передаточная функция для колебательного звена может иметь вид:

$$W(s) = \frac{k}{T_1^2 s^2 + T_2 s + 1} \text{ или } W(s) = \frac{k}{T^2 s^2 + 2\zeta T \cdot s + 1}.$$

Звено является колебательным, если $2T_1 > T_2$ ($0 < \xi < 1$). При $\xi > 1$ получим апериодическое звено второго порядка. Переходная характеристика колебательного звена представлена на рис. 1.19.

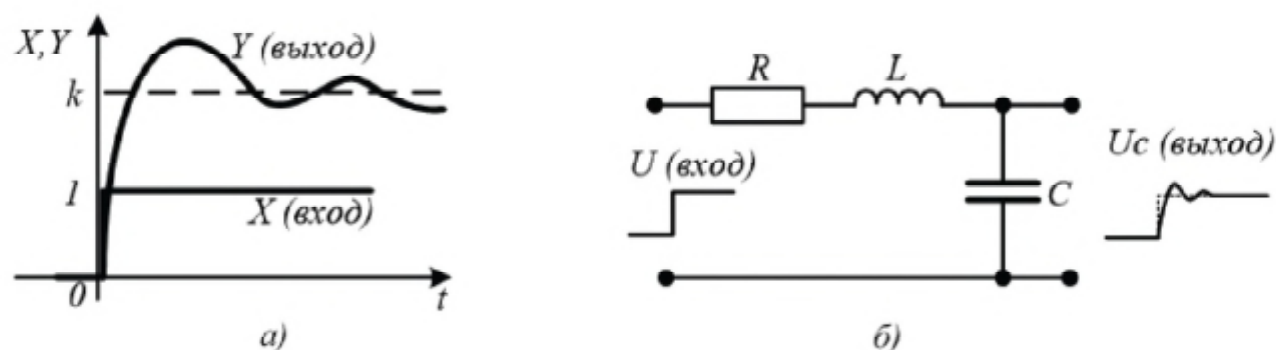


Рисунок 1.19. Переходная характеристика (а) и пример (б) колебательного звена

Амплитудно-фазовая частотная характеристика колебательного показана на рис. 1.20, а. Выражение для модуля частотной функции имеет вид:

$$W(\omega) = \frac{k}{\sqrt{(1 - \omega^2 T_1^2)^2 + \omega^2 T_2^2}}.$$

Формулы расчета фазового угла следующие:

$$\varphi(\omega) = \begin{cases} \arctg\left(\frac{-\omega T_2}{1 - \omega^2 T_1^2}\right), & \text{при } \omega < 1/T_1, \\ -180^\circ - \arctg\left(\frac{-\omega T_2}{1 - \omega^2 T_1^2}\right), & \text{при } \omega \geq 1/T_1. \end{cases}$$

Для построения асимптотической ЛАЧХ колебательного звена (рис. 1.20, б) находят частоту сопряжения $\omega_c = 1/T_1$, проводят прямую, параллельную оси частот с ординатой $20 \lg k$ до точки ω_c , а из этой точки проводят прямую с наклоном -40 дБ/дек. Отметим, что асимптотическая ЛАЧХ колебательного звена имеет существенную погрешность.

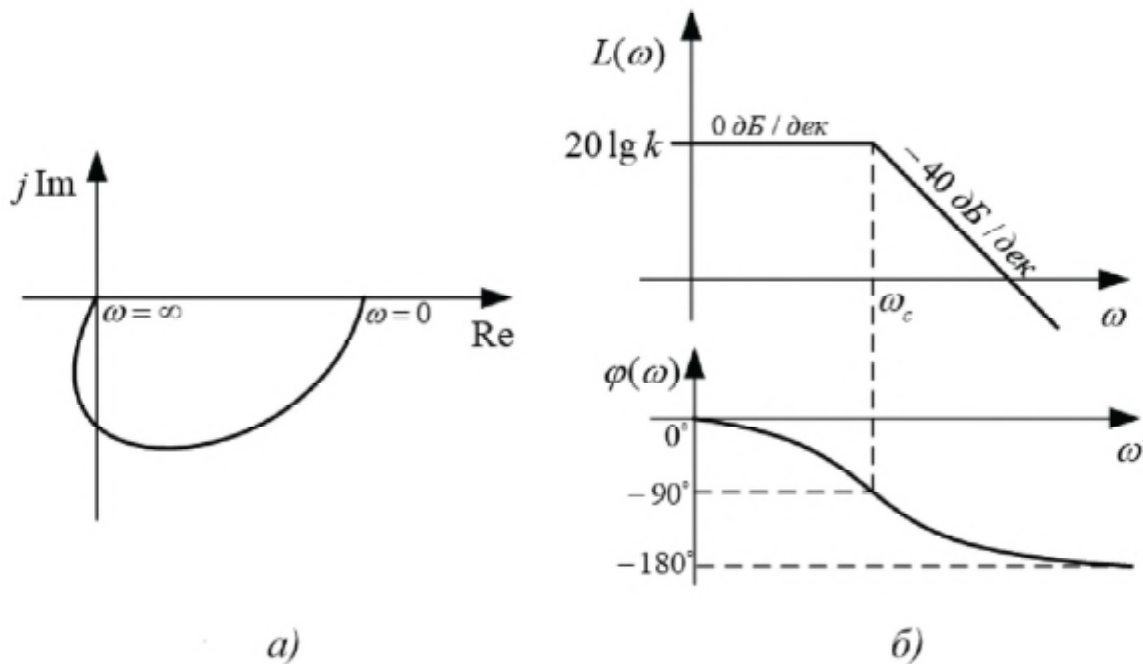


Рисунок 1.20. Частотные характеристики колебательного звена

1.8.5. Дифференцирующее звено

Для **идеального дифференцирующего звена** выходной и входной параметр связан дифференциальным уравнением вида $y(t) = k \frac{dt}{dt}$ (переходная характеристика изображена на рис. 1.21, а).

Передаточная функция имеет вид

$$W(s) = ks.$$

Частотная функция звена: $W(j\omega) = j\omega k$, то есть амплитудно-частотная характеристика строится по выражению

$$A(\omega) = W(\omega) = \omega k.$$

Фазовая частотная характеристика при всех значениях частот одинакова:

$$\varphi(\omega) = 90^\circ = \frac{\pi}{2}.$$

Годограф (график АФЧХ) идеального дифференцирующего звена (рис. 1.22, а) представляет собой прямую, которая совпадает с осью положительных значений мнимых величин.

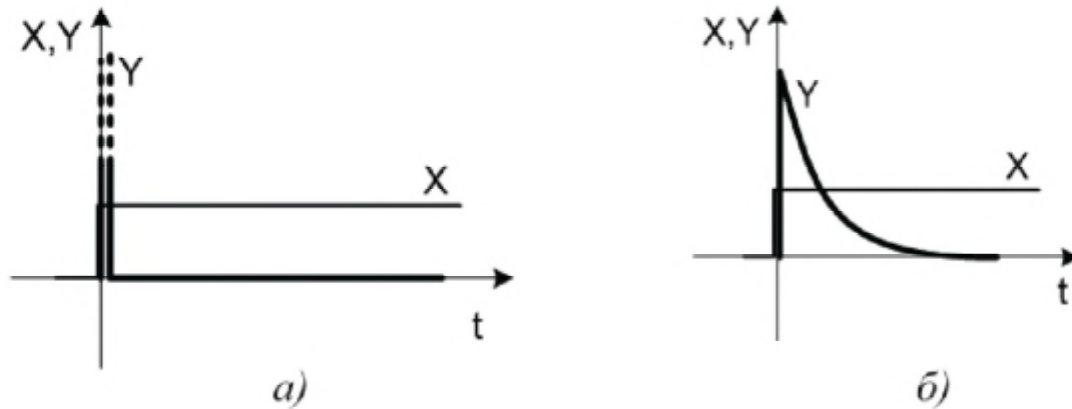


Рисунок 1.21. Переходные характеристики идеального (а) и реального (б) дифференцирующего звена

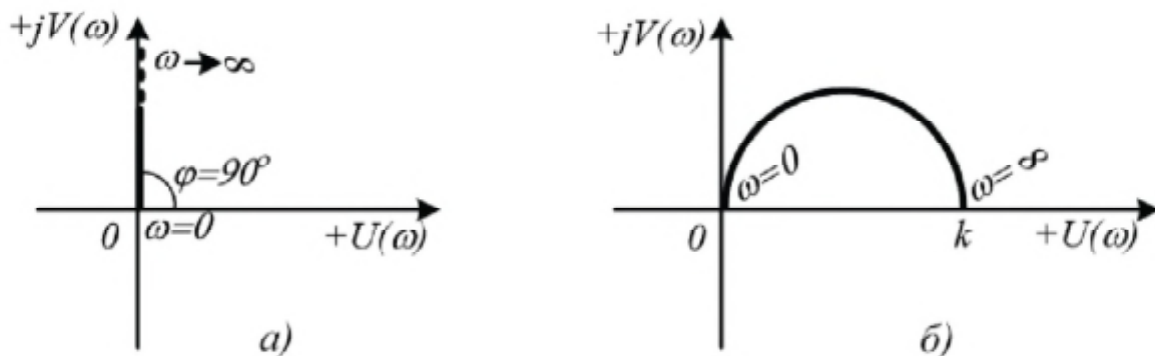


Рисунок 1.22. АФЧХ идеального (а) и реального (б) дифференцирующего звена

Аналитическое выражение для ЛАЧХ $L = 20 \cdot \lg(\omega k)$, а для ЛФЧХ $\varphi = \arctg(\infty) = \pi / 2$. Асимптотическая ЛАЧХ – бесконечная прямая с наклоном +20 дБ/дек, ЛФЧХ – прямая, параллельная оси абсцисс с ординатой $+\pi / 2$ (рис. 1.23, а).

Для **реального дифференцирующего звена** (переходная характеристика на рис. 1.21, б) передаточная функция имеет вид

$$W(s) = \frac{kT}{1 + sT}.$$

Годограф располагается в первом квадранте комплексной плоскости и представляет собой полуокружность (рис. 1.22, б).

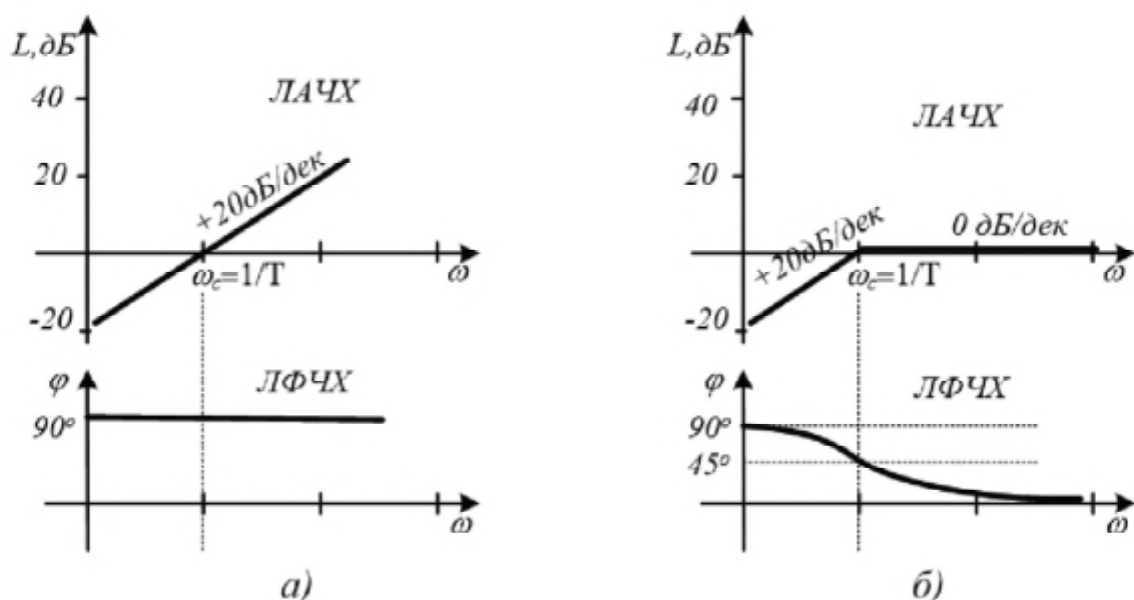


Рисунок 1.23. Логарифмические частотные характеристики идеального (а) и реального (б) дифференцирующего звена

Аналитическое выражения для ЛАЧХ имеет вид

$$L(\omega) = 20 \cdot \lg \left(\frac{\omega k}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}} \right).$$

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика $L(\omega)$ в области низких частот (до частоты сопряжения $\omega_c = \frac{1}{T} = k$) представляет собой прямую с наклоном $+20 \text{ dB/дек}$, а в высокочастотной области график совпадает с осью абсцисс (рис. 1.23, б). ЛФЧХ рассчитывается и строится по формуле

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \arctg(\omega T).$$

1.9. Основные понятия теории устойчивости

В процессе работы любого технологического оборудования, система подвергается различного рода возмущающим воздействиям (включениям, переключениям, изменением параметров), которые вызывают отклонения значений регулируемых параметров от заданной величины. Для используемых систем требуется, чтобы после прекращения этих возмущений система продолжила работать, то есть была устойчивой.

«Система автоматического управления называется устойчивой, если после прекращения действия возмущений, вызвавших ее отклонение от положения равновесия, она возвращается в это положение равновесия или заданного движения».

Только устойчивая система работоспособна и будет реализована в производственных процессах.

Для определения устойчивости применяют корневой метод, алгебраические и частотные критерии.

Корневой метод определения устойчивости.

Для использования корневого метода получают характеристическое уравнение САУ – знаменатель передаточной функции.

Характеристическое уравнение имеет вид:

$$D(s) = a_0 s^n + \dots + a_{n-2} s^2 + a_{n-1} s + a_n = 0.$$

Если корни этого уравнения «левые» (располагаются в левой полуплоскости корневой плоскости), то система устойчива.

По корням характеристического уравнения определяют запасы устойчивости (рис. 1.24):

– степень устойчивости (или быстродействие) η определяется расстоянием ближайшего левого действительного корня или пары комплексно-сопряженных корней до мнимой оси.

– колебательность (склонность системы к колебанию):

$$\mu = \frac{\beta}{\alpha} = \max \left| \frac{\operatorname{Im} \lambda_v}{\operatorname{Re} \lambda_v} \right|,$$

где α и β – координаты корней, имеющих наибольшее удаление от оси вещественных значений.

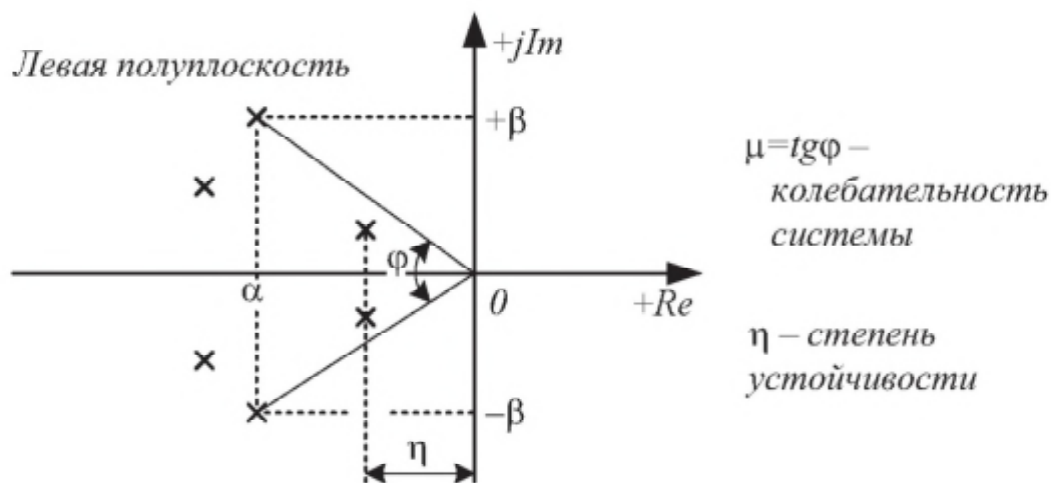


Рисунок 1.24. Корневая плоскость

Пример.

САР описывается передаточной функцией $W(s) = \frac{250}{0,001s^2 + 0,8s + 251}$.

Определим устойчивость системы и запасы устойчивости.

1. Получаем характеристическое уравнение из знаменателя передаточной функции:

$$D(s) = 0,001s^2 + 0,8s + 251 = 0.$$

2. Находим корни характеристического уравнения:

$$s_{1,2} = \frac{-0,8 \pm \sqrt{0,8^2 - 4 \cdot 0,001 \cdot 251}}{2 \cdot 0,001} = \frac{-0,8 \pm \sqrt{0,8^2 - 4 \cdot 0,001 \cdot 251}}{2 \cdot 0,001} = \frac{-0,8 \pm \sqrt{-0,364}}{0,002};$$

$$s_{1,2} = \frac{-0,8 \pm j\sqrt{0,364}}{0,002} = \frac{-0,8 \pm j \cdot 0,60}{0,002};$$

$$s_{1,2} = -400 \pm j300.$$

3. На рис. 1.25 изображены корни характеристического уравнения. Так как корни «левые», то САР устойчива: степень устойчивости $\eta = 400$, колебательность $\mu = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{300}{400} = 0,75$.

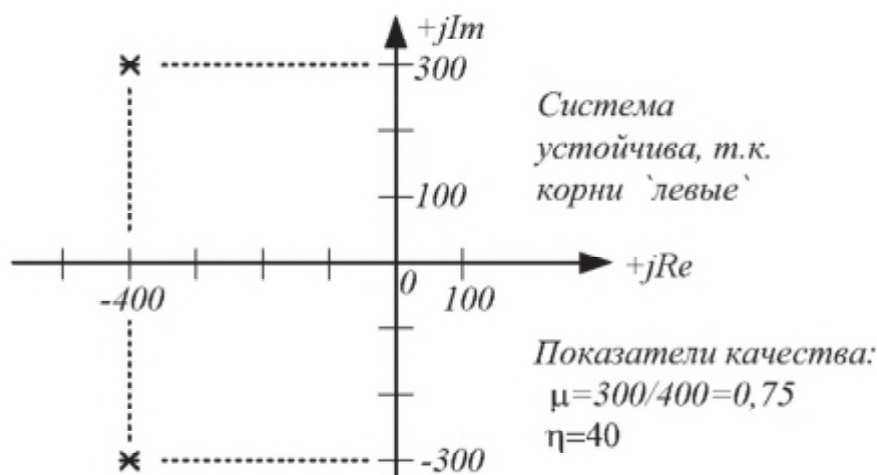


Рисунок 1.25. Определение устойчивости по корням характеристического уравнения

1.9.1. Алгебраические критерии устойчивости

Для определения устойчивости с применением алгебраических критериев составляют характеристическое уравнение.

Характеристическое уравнение – это знаменатель передаточной функции, приравненный к нулю. Например, характеристическое уравнение 3-го порядка имеет вид:

$$a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3 = 0.$$

Необходимым условием устойчивости является положительность всех коэффициентов характеристического уравнения $a_0 > 0; a_1 > 0; a_2 > 0; a_3 > 0$.

Критерий устойчивости Гурвица.

Для определения устойчивости по критерию Гурвица нужно построить определитель вида

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots \\ 0 & a_1 & a_3 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & a_n \end{vmatrix}.$$

Система устойчива, если все коэффициенты положительны, а также положительны и все определители, начиная со второго порядка, построенные от верхнего левого угла.

Условия устойчивости Гурвица.

1) Уравнение 1-го порядка $a_0 p + a_1 = 0$. Условия: $a_0 > 0$; $\Delta_1 = a_1 > 0$.

2) Уравнение 2-го порядка $a_0 p^2 + a_1 p + a_2 = 0$.

Условия: $a_0 > 0$; $\Delta_1 = a_1 > 0$; $\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & 0 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 > 0$.

3) Уравнение 3-го порядка $a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0$.

Условия: $a_0 > 0$; $\Delta_1 = a_1 > 0$; $\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0$; $\Delta_3 = a_3 \Delta_2 > 0$.

4) Уравнение 4-го порядка $a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4 = 0$.

Условия: $a_0 > 0$; $\Delta_1 = a_1 > 0$; $\Delta_2 = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0$; $\Delta_3 = a_3 \Delta_2 - a_1^2 a_4 > 0$; $\Delta_4 = a_4 \Delta_3 > 0$.

Критерий устойчивости Рауса.

Критерий Рауса часто используется для реализации на ЭВМ, так как требует меньших объемов вычислений.

Для определения устойчивости системы по данному критерию составляют таблицу Рауса (табл. 1.5), на основании которой проверяют условия: **необходимо и достаточно, чтобы все элементы первого столбца таблицы Рауса были строго положительны.**

Таблица 1.5

Таблица Рауса

Коэффициенты	Номер столбца			
	1	2	3	4
	a_0	a_2	a_4	a_6
	a_1	a_3	a_5	a_7
$r_0 = \frac{a_0}{a_1}$	$c_{13} = a_2 - r_0 a_3$	$c_{23} = a_4 - r_0 a_5$	$c_{33} = a_6 - r_0 a_7$	$c_{43} = a_8 - r_0 a_9$
$r_1 = \frac{a_1}{c_{13}}$	$c_{14} = a_3 - r_1 c_{23}$	$c_{24} = a_5 - r_1 c_{33}$	$c_{34} = a_7 - r_1 c_{43}$	$c_{44} = a_9 - r_1 c_{53}$
$r_2 = \frac{c_{13}}{c_{14}}$	$c_{15} = c_{23} - r_2 c_{24}$	$c_{25} = c_{33} - r_2 c_{34}$	$c_{35} = c_{43} - r_2 c_{44}$	$c_{45} = c_{53} - r_2 c_{54}$
...

1.9.2. Частотные критерии устойчивости

Критерий устойчивости Михайлова.

Рассмотрим характеристический полином – правую часть характеристического уравнения:

$$D(s) = a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + a_2 s^{n-2} + \dots + a_n.$$

Произведем в этом полиноме замену $s = j\omega$, получаем частотный характеристический комплекс вида:

$$D(j\omega) = \text{Re}(\omega) + j\text{Im}(\omega) = D e^{j\varphi},$$

где вещественная часть включает чётные степени частоты ω :

$$\text{Re}(\omega) = U(\omega) = a_0 - a_2 \omega^2 + \dots,$$

а мнимая часть – нечётные степени частоты ω :

$$\text{Im}(\omega) = V(\omega) = a_1 \omega - a_3 \omega^3 + \dots$$

Функции зависимости $D(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ – это модуль и фаза характеристического уравнения соответственно.

Система будет устойчива, если корни характеристического уравнения лежат в левой полуплоскости (нет корней в правой полуплоскости), для этого требуется, чтобы полное приращение фазы $\varphi(\omega)$ при изменении частоты ω от 0 до ∞ было равно $n\frac{\pi}{2}$, где n – степень характеристического уравнения $D(s)$. Если полное приращение аргумента $\varphi(\omega)$ окажется меньше $n\frac{\pi}{2}$, то система неустойчива.

Для определения устойчивости по критерию Михайлова, характеристический комплекс $D(j\omega)$ изображают на комплексной плоскости в виде годографа.

Для устойчивости системы n -порядка, годограф (кривая) Михайлова при изменении частоты от 0 до $+\infty$ должен начинаться на положительной вещественной оси и последовательно проходить n -квадрантов против часовой стрелки (рис. 1.26, а).

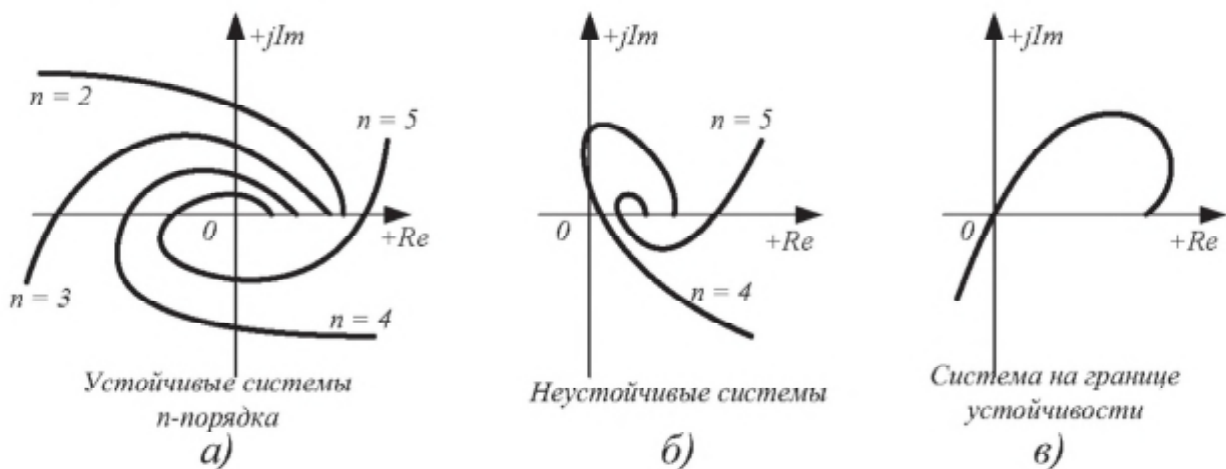


Рисунок 1.26. Кривые Михайлова для определения устойчивости систем

Если пропущен хотя бы один квадрант (рис. 1.26, б), то система неустойчивая. Если кривая Михайлова начинается в начале координат или проходит через него, то система на границе устойчивости (рис. 1.26, в).

Пример.

САР описывается передаточной функцией $W(s) = \frac{250}{0,001s^2 + 0,8s + 251}$.

1. Получаем характеристическое уравнение второго порядка ($n = 2$) из знаменателя передаточной функции:

$$D(s) = 0,001s^2 + 0,8s + 251 = 0.$$

2. Получаем характеристический комплекс $D(j\omega)$, заменив $s \rightarrow j\omega$:

$$D(j\omega) = 0,001(j\omega)^2 + 0,8j\omega + 251 = 0,$$

$$D(j\omega) = -0,001\omega^2 + j0,8\omega + 251 = 0,$$

$$D(j\omega) = [-0,001\omega^2 + 251] + j[0,8\omega] = 0,$$

$$\operatorname{Re}(D(j\omega)) = -0,001\omega^2 + 251,$$

$$\operatorname{Im}(D(j\omega)) = 0,8\omega.$$

3. Рассчитаем точки для построения годографа Михайлова

ω	0	100	500,999	600	∞
$\operatorname{Re}(D(j\omega))$	251	241	0	-109	$-\infty$
$\operatorname{Im}(D(j\omega))$	0	80	400,8	480	∞

4. Годограф Михайлова имеет вид рис. 1.27. Так как имеем систему 2-го порядка, и годограф Михайлова начинаясь на положительной части вещественной оси последовательно проходит через 2 четверти, то система устойчива.

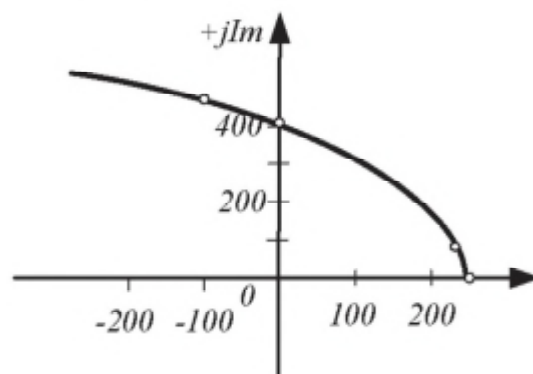


Рисунок 1.27. Годограф Михайлова устойчивой системы с характеристическим уравнением 2-го порядка

Критерий устойчивости Найквиста.

Критерий устойчивости Найквиста основан на анализе АФЧХ разомкнутой системы.

Если система автоматического управления, устойчива в разомкнутом состоянии, то она будет устойчива и в замкнутом состоянии, если годограф АФЧХ разомкнутой системы при изменении частоты ω от 0 до ∞ не охватывает критическую точку с координатами $(-1, j0)$ (рис. 1.28).

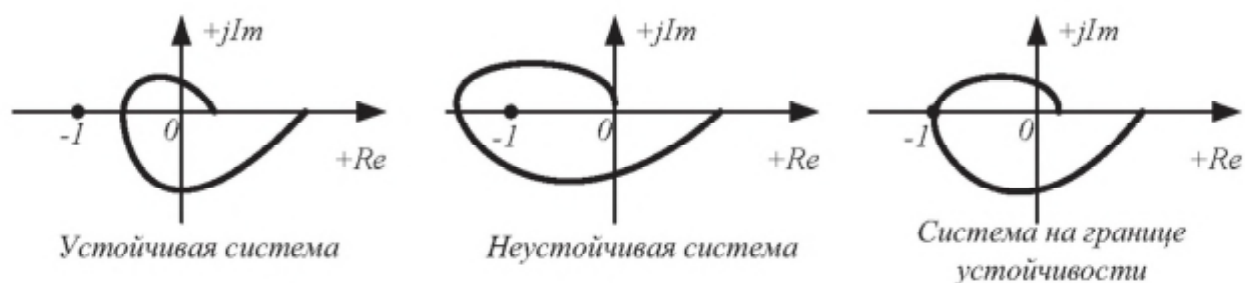


Рисунок 1.28. Примеры годографов для определения устойчивости систем по критерию Найквиста

Определение устойчивости для астатических систем имеет особенности, так как их АФЧХ имеют бесконечный разрыв.

У **астатических систем** в знаменателе передаточной функции есть множитель s^n , то есть имеет вид

$$W(s) = \frac{b_0 s^3 + b_1 s^2 + \dots}{s^n (a_0 s^3 + a_1 s^2 + \dots)},$$

где n – номер порядка астатизма.

Для оценки устойчивости астатической замкнутой системы, АФЧХ разомкнутой системы дополняют дугой бесконечно большого радиуса, чтобы получить замкнутую кривую, далее используют критерий Найквиста (рис. 1.29).

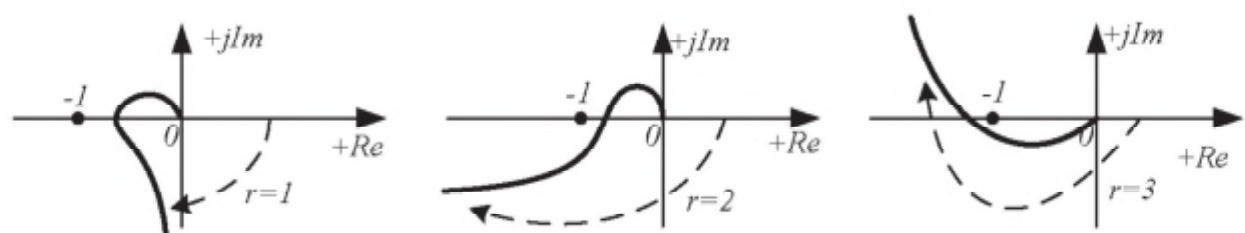


Рисунок 1.29. Устойчивые САУ с астатизмом r -порядка

1.9.3. Запасы устойчивости

Запасы устойчивости численно показывают удаленность параметров устойчивой САУ от границы устойчивости.

Рассмотрим запасы устойчивости, определяемые по АФЧХ разомкнутой системы, то есть на основе критерия Найквиста.

Очевидно, что чем ближе кривая АФЧХ разомкнутой САУ проходит к критической точке $(-1; j0)$, тем ближе замкнутая САУ к границе устойчивости.

Выделяют параметры: **запас устойчивости по фазе γ** и **по амплитуде (модулю) h** . Например, АФЧХ разомкнутой системы (рис. 1.30) не охватывает точку с координатами $(-1; j0)$, то есть замкнутая система устойчива, определим запасы устойчивости в общем виде.

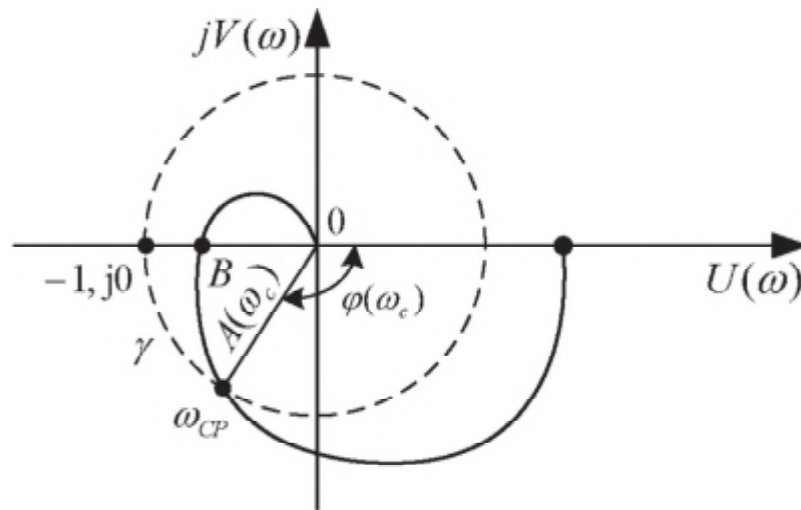


Рисунок 1.30. АФЧХ разомкнутой САУ

Запас устойчивости по фазе определяется выражением

$$\gamma = 180^\circ - |\varphi(\omega_c)|,$$

и это есть угол γ , который образуется между отрицательной полуосью вещественных значений и точкой ω_{CP} пересечения кривой АФЧХ с единичной окружностью.

Частота точки ω_{CP} , при которой годограф АФЧХ пересекается с окружностью единичного радиуса, называется **частотой среза системы**.

Запас устойчивости по амплитуде (модулю) h – это величина обратная геометрической удаленности точки АФЧХ при частоте $\omega = \omega_\pi$ от начала координат, определяется по формуле

$$h = \frac{1}{OB} = \frac{1}{A(\omega_\pi)},$$

где $A(\omega_\pi)$ – значение амплитуды, при которой годограф пересекает вещественную ось.

Обычно для САУ требуется выполнение следующих условий по запасам устойчивости:

$$\gamma \geq 24^\circ; h \geq 2.$$

1.10. Анализ качества САУ

Показатели качества САУ – это параметры количественной оценки качества системы. **Прямые показатели качества** системы автоматического управления определяют по графику переходного процесса (рис. 1.31).

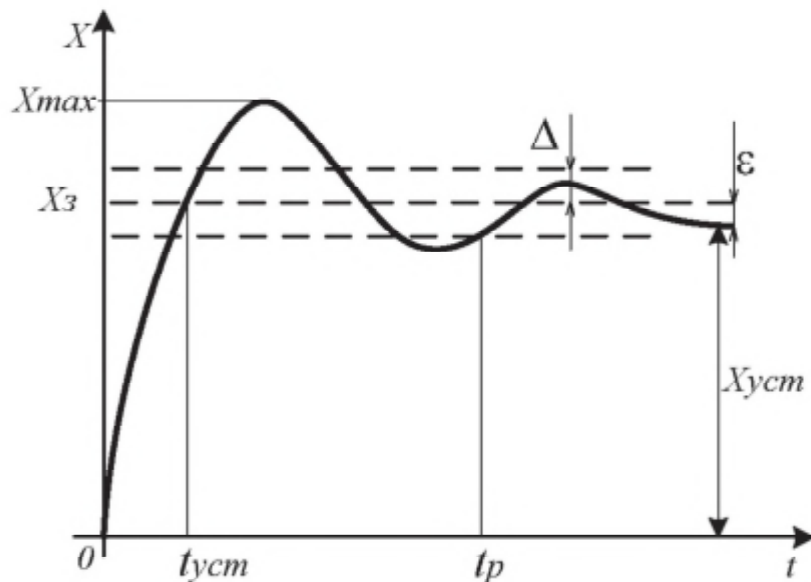


Рисунок 1.31. Определение прямых показателей качества

Рассмотрим некоторые прямые показатели качества:

1. Величина перерегулирования σ :

$$\sigma = \frac{x_{\max} - x_{уст}}{x_{уст}} 100\%.$$

Определяется как максимальное отклонение регулируемой величины от ее установившегося значения.

2. Время переходного процесса (так же называют время регулирования) t_p – это наименьший период времени, после которого отклонение регулируемого параметра от заданной величины не превышает Δ (обычно $\Delta \leq 0,02 - 0,05$ от заданного).

3. Статическая ошибка ε – это величина отклонения установившегося $X_{уст}$ от требуемого (заданного) значения X_3 :

$$\varepsilon = X_3 - X_{уст}.$$

4. Время установления $t_{уст}$ – промежуток времени, за который регулируемый параметр первый раз достигает заданного значения.

Существуют и другие методы определения качества системы автоматического регулирования: корневые (см. рис. 1.25), интегральные и др.

1.11. Задачи синтеза САУ

Под синтезом системы автоматического управления понимается выбор ее структурной схемы, параметров, способа технической реализации элементов, при которых достигаются требуемые динамические и эксплуатационные свойства системы.

Одной из подзадач синтеза является определение **закона управления**, который обеспечивает требуемые показатели устойчивости и качества САУ.

Закон управления – это функциональная зависимость управляющего воздействия от сигнала ошибки.

При синтезе САУ объект управления и исполнительные органы являются неизменяемой частью системы. Параметры неизменяемой части являются исходной информацией. Обозначим неизменяемую часть САУ передаточной функцией $W_O(s)$.

Требуется определить способы установки и характеристики корректирующего устройства, которое улучшит показатели качества или устойчивости исходной САУ.

Выделяют три способа коррекции систем автоматического управления:

1. Последовательная коррекция:

$$W(s) = W_{ПОР}(s) \cdot W_O(s),$$

где $W_{ПОР}(s)$ – передаточная функция последовательного корректирующего устройства.

2. Параллельная коррекция:

$$W(s) = W_{ПАР}(s) + W_O(s),$$

где $W_{ПАР}(s)$ – передаточная функция корректирующего устройства, устанавливаемого параллельно.

3. Коррекция в виде обратных связей:

$$W(s) = \frac{W_O(s)}{1 \pm W_{ОС}(s)W_O(s)},$$

где $W_{ОС}(s)$ – передаточная функция корректирующего звена, установленного в обратной связи.

1.12. Законы управления

Пропорциональный закон (П-закон) управления вводит в процесс управления сигнал пропорциональный ошибке:

$$u(t) = k_{П} \cdot \varepsilon(t),$$

где $u(t)$ – сигнал управления;

$\varepsilon(t)$ – ошибка управления;

$k_{П}$ – коэффициент передачи регулятора.

Передаточная функция такого регулятора имеет вид:

$$W_{П}(s) = k_{П}.$$

Введение П-закона увеличивает быстродействие системы (при $k_{II} > 1$), но приближает систему управления к границе устойчивости.

Интегральный закон (И-закон) управления повышает точность системы, так как сигнал управления пропорционален интегралу ошибки (суммарной ошибке за интервал времени dt): $u(t) = \frac{1}{T_I} \int \varepsilon dt$. Передаточная функция регу-

лятора: $W_I(s) = \frac{1}{T_I \cdot s}$.

Недостатком введения И-регулятора в систему управления является увеличение колебательности.

Дифференциальный закон (Д-закон) управления снижает колебательность и повышает устойчивость системы управления.

Д-регуляторы вырабатывают сигнал пропорциональный скорости изменения (дифференциалу) ошибки. То есть чем быстрее изменяется ошибка выходного параметра, тем больше сигнал управления: $u(t) = T_D \frac{d\varepsilon}{dt}$.

Передаточная функция Д-регулятора имеет вид: $W_D(s) = T_D \cdot s$.

Для повышения качества систем устанавливают регуляторы с несколькими законами управления: ПИ-, ПД-, ПИД-регуляторы.

В этом случае каждый из законов вносит в САУ свои достоинства и недостатки.

ПИ-регуляторы (**изодромное** управление) характеризуются быстродействием и точностью управления, имеют передаточную функцию:

$$W_{ПИ}(s) = k_{II} + \frac{1}{T_I \cdot s}.$$

ПИД-регуляторы имеют преимущества всех типов регулирования: быстродействие, точность и устойчивость, имеют передаточную функцию:

$$W_{ПИД}(s) = k_{II} + \frac{1}{T_I \cdot s} + T_D \cdot s.$$

ПИД-регуляторы имеют много положительных характеристик, но не всегда их установка рациональна.

Контрольные вопросы

1. Какие типы систем автоматического управления выделяют?
2. Какие способы описания объектов применяют для анализа САУ?
3. В чем особенность систем автоматического регулирования в отличие от систем автоматического управления?
4. Какие типовые динамические звенья выделяют?
5. Что такое устойчивость САУ? Как её определяют?
6. Назовите прямые показатели качества САУ.
7. Назовите типы регуляторов и их особенности.

2. ФУНКЦИИ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ

2.1. Структура автоматизированных систем управления технологическими процессами

В автоматизированных системах управления технологическими процессами (АСУ ТП) выделяют три уровня (рис. 2.1).

Нижний уровень – это уровень оборудования (входов/выходов), датчиков (чувствительных элементов, сенсоров) и измерительных приборов, контролируемых управляемых параметров и это уровень исполнительных устройств, воздействующих на технологические объекты для приведения параметров в соответствие с заданием.

Средний уровень – это уровень управления оборудованием, уровень программируемых логических контроллеров (ПЛК). Контроллеры получают информацию с контрольно-измерительных устройств и датчиков о технологическом процессе, и выдают в соответствии с алгоритмом управления команды на исполнительные механизмы.

Верхний уровень – это уровень промышленного сервера, сетевого оборудования, уровень операторских и диспетчерских станций (автоматизированных рабочих мест – АРМ). На верхнем уровне осуществляется контроль технологических параметров: собираются и анализируются данные с нижнего уровня, выполняется мониторинг (диспетчеризация) технологического процесса, визуализируются технологические объекты.

Три уровня АСУ ТП



Рисунок 2.1. Уровни АСУ ТП

На верхнем уровне требуется человек (оператор), осуществляющий мониторинг параметров технологического оборудования через так называемый человеко-машинный интерфейс (HMI – Human Machine Interface).

Для осуществления контроля работы различных агрегатов, устройств и механизмов и агрегатов используют специальные программные оболочки – SCADA-системы. SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) – в пер. с англ. диспетчерское управление и сбор данных.

SCADA-системы представляют собой программное обеспечение, которое настраивается и устанавливается на диспетчерских компьютерах. Они обеспечивают сбор, архивацию, визуализацию важнейших данных от ПЛК (программируемых логических контроллеров). SCADA-системы выполняют запись изменений технологических параметров и действий оператора, для обеспечения контроля манипуляций оператора в аварийных ситуациях. Таким образом, SCADA-системы обеспечивают персональную ответственность операторов.

Выбор средств автоматизации любого технологического процесса должен осуществляться с учетом характеристик технологического оборудования и параметров технологического процесса. Средства автоматизации необходимо подбирать не только по условиям правильного ведения технологического процесса, но и удовлетворяющие экономическим и надёжностным характеристикам.

2.2. Функции элементов автоматики

С помощью элементов автоматики осуществляются измерительные, управляющие, исполнительные и воспроизводящие действия с объектами управления (технологическим оборудованием).

Датчики (чувствительные элементы, sensor) осуществляют преобразование контролируемой или регулируемой величины в величину другого вида, более удобную для дальнейшей передачи или обработки элементами системы автоматического управления.

Усилители выполняют количественное преобразование (усиление или ослабление) входной величины.

Стабилизаторы поддерживают постоянство выходного параметра объекта или изменение этого параметра в заданных пределах.

Распределители поочередно подключают одну цепь (канал связи) к другим цепям.

Реле, в зависимости от функционального назначения могут быть защитные, сигнализирующие, контролирующие, усилительные и т. д.

Исполнительные механизмы воздействуют на регулирующий орган под действием сигнала управляющего устройства (например, открывают/закрывают или изменяют проходное сечение задвижки).

Элементы автоматики по физическим основам функционирования могут быть: электромеханические, ферромагнитные, электротепловые, электронные, радиоактивные и др.

2.2.1. Средства автоматизации нижнего уровня

К техническим средствам автоматизации нижнего уровня относятся датчики, преобразователи, измерительные приборы (см. главу 3).

Датчики выполняют функцию преобразования контролируемого технологического параметра в удобную форму.

Основной характеристикой датчика (преобразователя) является функция зависимости выходной величины α от входной x : $\alpha = f(x)$.

Чувствительностью датчика называется параметр равный отношению приращения его выходной величины датчика $\Delta\alpha$ к приращению Δx входной величины x :

$$S = \Delta\alpha / \Delta x.$$

Например, если датчик преобразовывает величину давления P в токовый сигнал I , то чувствительность будет определяться формулой $S = \Delta I / \Delta P$, и будет иметь размерность [А/Па].

Порог чувствительности датчика – это минимальное значение входного сигнала, которое может зарегистрировать преобразователь.

Предел преобразования датчика – это максимальная величина входного сигнала, которое может воспринять преобразователь без его повреждения. Например, максимально измеряемое давление P_{max} .

Погрешность преобразователя – это отклонение реальных измерений от номинальных характеристик, которые были получены при градуировке.

Наиболее удобными для реализации САУ являются электрические сигналы, поэтому наиболее распространены преобразователи неэлектрических величин в электрические:

- электромеханические преобразователи (реостатные, электромагнитные, тензометрические, электростатические и др.);
- электрохимические и тепловые преобразователи (термосопротивления, термоэлектрические датчики);
- электронные и ионизационные и др.

Преобразователи разделяют на два типа: **параметрические** и **генераторные**.

Преобразователь называется параметрическим, если для измерения входной величины необходим источник питания и неэлектрический параметр преобразуется в какую-либо электрическую величину (сопротивление R , индуктивность L , емкость C).

К классу параметрических измерительных преобразователей относятся индуктивные, резистивные, взаимоиндуктивные, емкостные, магнитоупругие, электролитические, фотоэлектрические преобразователи и терморезисторы.

Преобразователь называется генераторным, если неэлектрический параметр преобразуется в электродвижущую силу (ЭДС).

К классу генераторных измерительных преобразователей относятся индукционные, термоэлектрические, пьезоэлектрические и др. преобразователи.

2.2.2. Технические средства автоматизации среднего уровня

К средствам автоматизации среднего уровня относятся контроллеры, они собирают данные с разнообразных датчиков, выдают управляющие сигналы по какому-либо закону регулирования на исполнительные механизмы и взаимодействуют с верхним уровнем автоматизации.

Основные функции, выполняемые контроллерами:

- сбор данных от датчиков;
- передача данных на верхний уровень (оператору, диспетчеру, SCADA-системе);
- выработка управляющих решений на основе данных датчиков или указаний оператора;
- воздействие на исполнительные механизмы для регулирования параметров объекта управления.

На рис. 2.2 представлена упрощенная структура АСУ ТП, на которой выделен уровень локальных контроллеров и интерфейсный контроллер.

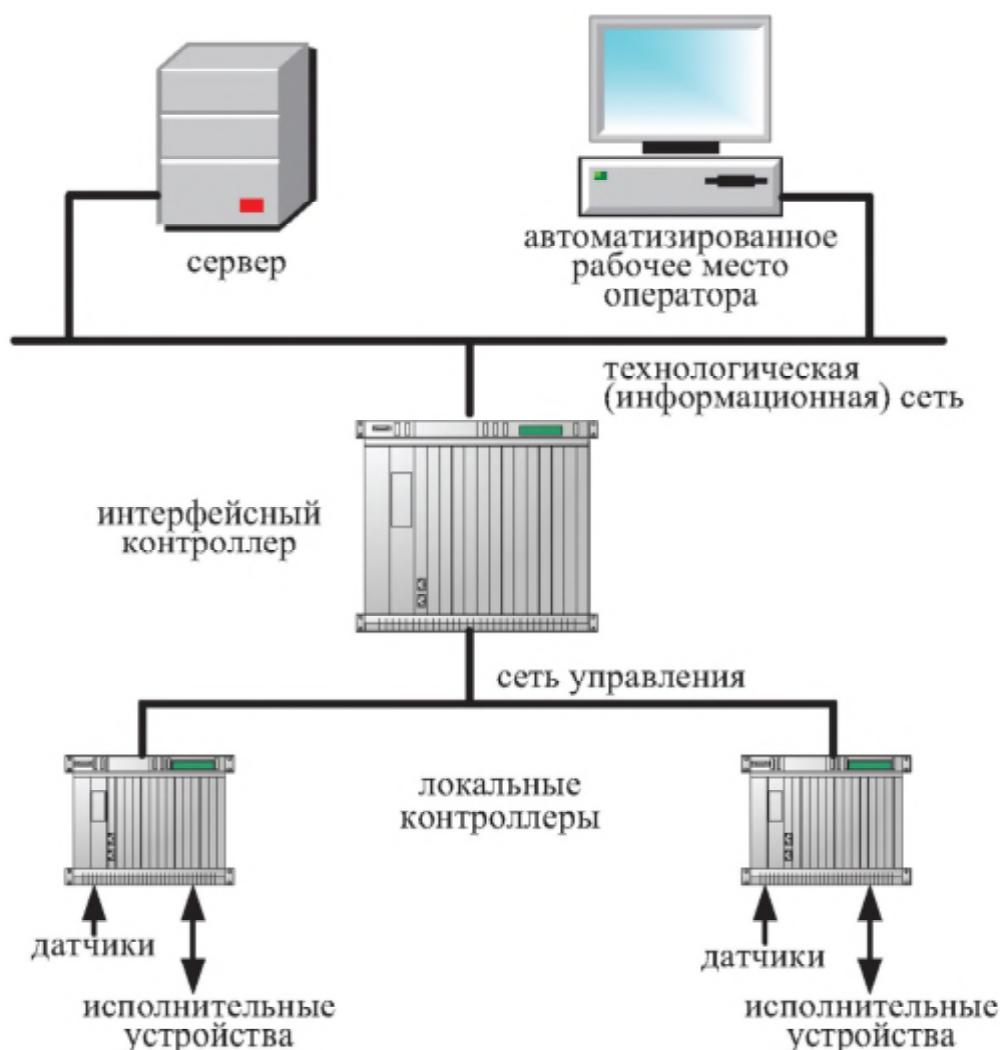


Рисунок 2.2. Структура АСУ ТП

Интерфейсный контроллер (или концентратор) может отсутствовать, в этом случае локальные контроллеры взаимодействуют с сервером и автоматизированным рабочим местом оператора напрямую.

Локальные контроллеры могут выполнять множество функций (рис. 2.3) и для осуществления управления должны иметь **входы** для определения текущего состояния объекта и **выходы** для передачи управляющих воздействий (рис. 2.4).



Рисунок 2.3. Функции контроллера

Данные технологических параметров с датчиков поступают на устройство связи с объектом УСО (рис. 2.4), которое преобразует физический сигнал (ток или напряжение) в цифровой сигнал. Этот сигнал поступает в «память данных» контроллера. Далее эти данные обрабатываются программами, хранящимися в «памяти программ», в результате получают выходные данные, которые со-

хранятся в памяти данных. Затем выходные данные поступают на устройство связи с объектом УСО, которое преобразует полученный цифровой сигнал в сигнал физический (ток или напряжение). Выходной сигнал с УСО поступает на исполнительные устройства, которые по команде контроллера выполняют действия (открывают или закрывают задвижки, регулируют расход потока, меняют частоту вращения приводов, сигнализируют и др.).

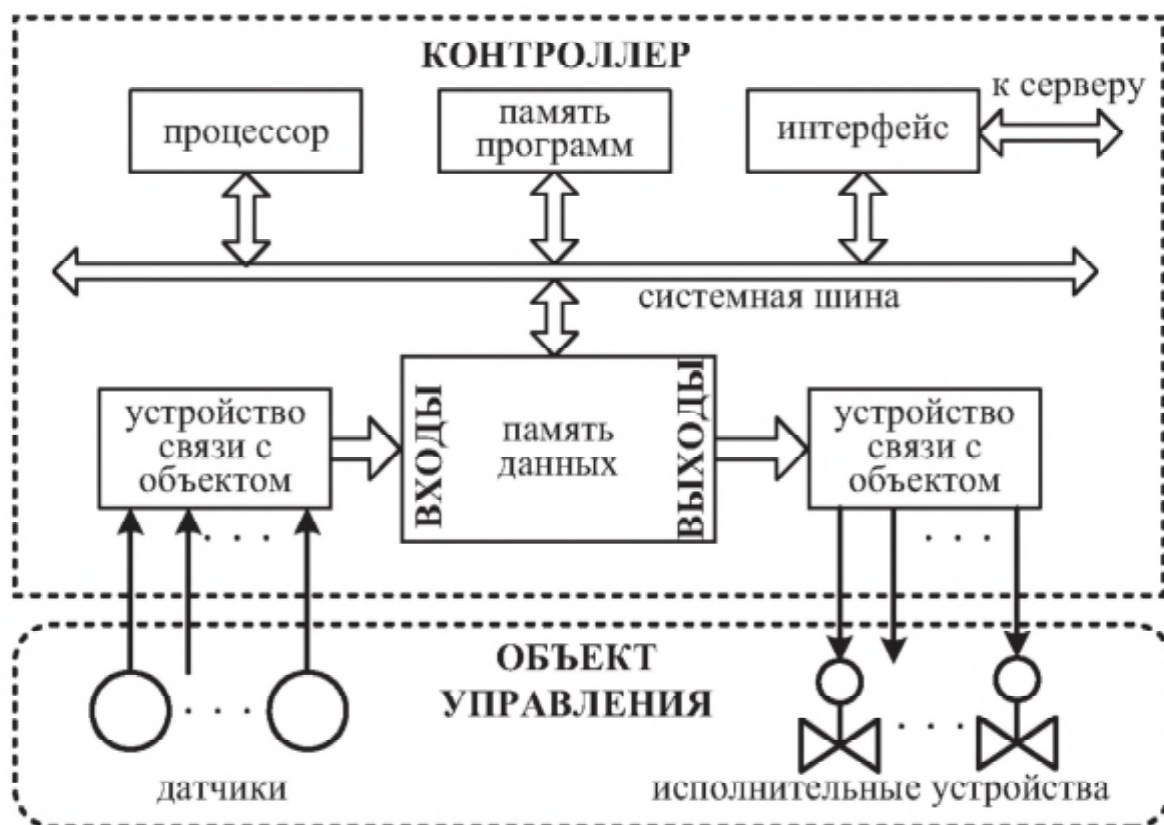


Рисунок 2.4. Упрощенная схема контроллера

Кроме того, входные данные (данные технологического процесса) передаются через интерфейс на сервер с базой данных и автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора.

Интерфейсное устройство также принимает команды управления с верхнего уровня (от оператора).

Контроллер – это совокупность электронных плат, соединенных системной шиной. Платы контроллера легко меняются, то есть обеспечивается принцип модульности.

Модули контроллера:

- 1) плата с главным процессором, называемая центральным процессорным устройством;
- 2) модули ввода/вывода – это модули устройства связи с объектом УСО;
- 3) интерфейсные модули (или коммуникационные модули) – обеспечивают взаимосвязь контроллера с внешними системами;
- 4) модуль питания;

5) модули сопроцессора, усиливающие вычислительные мощности центрального процессора.

Процессоры описываются следующими характеристиками:

- рабочая частота и разрядность (определяют быстродействие контроллеров);

- объем памяти ОЗУ (RAM) – оперативного запоминающего устройства и ПЗУ (ROM) – постоянного запоминающего устройства.

В настоящее время частота микропроцессоров составляет от десятков до сотен МГц, используются 8-ми и 16-и разрядные шины. Наиболее известные производители процессоров для контроллеров – это фирмы Motorola, Intel, AMD.

Каналы ввода/вывода контроллера характеризуются их количеством (4, 8, 16, 32, или 64) и уровнем сигналов (напряжения или тока).

Модули дискретного ввода/вывода коммутируют (включают, отключают, переключают) постоянное напряжение 12, 24, 48 В, переменное напряжение 120 и 240 В.

Модули аналогового ввода/вывода коммутируют токовые сигналы 0–20 мА, 4–20 мА, сигналы напряжения 0–5 В, 0–10 В, ± 5 В, ± 10 В.

Каналы передачи данных (физический путь между узлами сети) могут выполняться коаксиальным кабелем, кабелем из витой пары, волоконно-оптическим кабелем, спутниковой связью, радиосвязью и др.

Для обеспечения взаимодействия элементов сети используют заданный набор соглашений и правил – **сетевой протокол**, он определяет типы сигналов, форматы данных, тип кабелей и разъемов. Наиболее используемые сетевые протоколы – FF-протокол (Foundation Fieldbus) и HART-протокол (Highway Addressable Remote Transducer).

Выделяют следующие **способы доступа узлов к вычислительным сетям**:

- командные вычислительные сети, в которых контроллер опрашивает поочередно узлы сети;

- сети со случайным доступом, в которых узлы следят за передачей данных (равноправная сеть);

- сети с эстафетной передачей, в которых узел желающий передать информацию должен дожидаться «маркера» (программы позволяющей передавать данные).

В современных системах используются следующие управляющие сети: Control Net, Modbus, DH+, Genius, Industrial Ethernet, Profibus.

Сети, которые обеспечивают обмен информации на верхнем уровне (серверы и АРМ), называются информационными (технологическими). Здесь наиболее часто используют сеть Ethernet с протоколом TCP/IP.

На объектах добычи нефти и попутного нефтяного газа в Западной Сибири используются контроллеры фирм Allen-Bradley (США), Siemens (Германия), Motorola (США) и др. При выборе контроллера учитывают число обрабатываемых сигналов. Например, для кустовых площадок нефтедобычи количество входящих сигналов составляет более 100

Рассмотрим характеристики некоторых промышленных контроллеров (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Сравнительные характеристики контроллеров

Контроллер	SLC 500	PLC-5 / 1771	Melsec System Q(H)
Производитель	Rockwell Automation	Allen Bradley	Mitsubishi Electric
Максимальное число Вх/Вых	84; 94; 104; 960; 4096.	от 512 до 3072	до 8192
Тип Вх/Вых	ControlNet Вх/Вых и др.	локальные и расширенные Вх/Вых; Control Net; Device Net и др.	ControlNet; DeviceNet; 30 локальных модулей Вх/Вых; ControlNet Вх/Вых.
Память	8К слов; 16К слов; 64К слов и др.	от 6К до 100К слов	до 32 Мб
Связь	– Ethernet; – ControlNet; – DeviceNet; – DH+; – DH-485; – RS-232-C; – Universal Remote I/O	– Ethernet; – ControlNet; – DeviceNet; – DH+; – RS-232-C/422-A/423-A; – Universal Remote I/O	– Ethernet; – CANopen; – ROFIBUS/ DP; – DeviceNet; – CC-Link; – AS-Interface

2.2.3. Технические средства автоматизации верхнего уровня

К средствам автоматизации верхнего уровня относятся рабочие станции операторов и серверы, которые предназначены для выполнения регистрации, анализа данных и учета состояний технологических процессов (рис. 2.5).

Сеть верхнего уровня (Ethernet) объединяет станции управления операторов, автоматизированные рабочие места специалистов (технологов, руководителей и др.) и серверы.



Рисунок 2.5. Функции верхнего уровня управления

Для взаимодействия человека (оператора) с техническим объектом требуется **человеко-машинный интерфейс (НМИ)** – средство управления машины человеком.

В нашем случае человеко-машинный интерфейс это технические средства (монитор, клавиатура и т. п.) и программная оболочка, которая позволяет получать данные и управлять технологическим процессом.

Программная часть НМИ получила название SCADA-системы (аббревиатура от англ. Supervisory Control And Data Acquisition – диспетчерское управление и сбор данных) – позволяет разрабатывать АРМ и обеспечивает в реальном времени сбор, обработку, отображение и архивирование информации об объекте мониторинга или управления.

Функции SCADA-систем представлены на рис. 2.6.

Концепцией SCADA-систем является их **открытость**, то есть обеспечение свободного взаимодействия с программами и техническими средствами разных производителей.

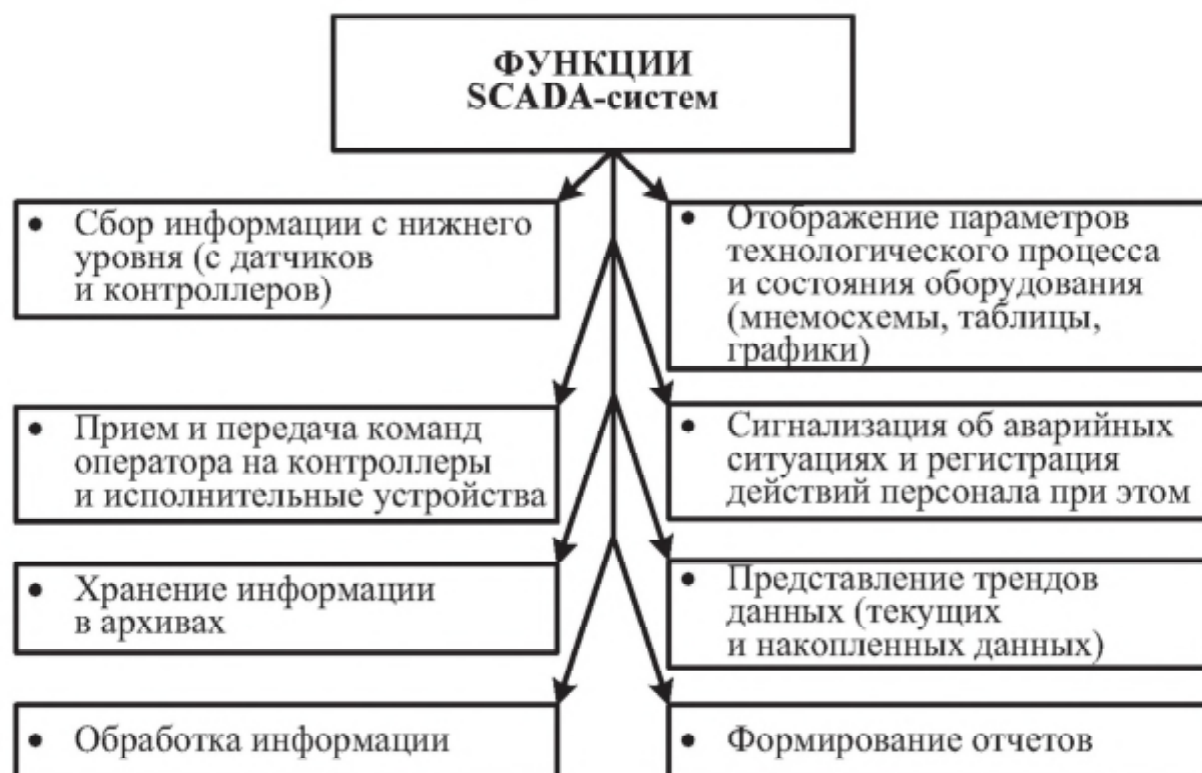


Рисунок 2.6. Функции SCADA-систем

Для обеспечения открытости SCADA-системы должны иметь типовые протоколы обмена с наиболее используемыми промышленными сетями (ControlNet, Genius, Profibus и др.); и должны быть совместимы с типовыми базами данных.

Одной из важных характеристик SCADA-системы является ее **надежность**, которая обеспечивается резервированием компонентов системы, наличием средств сохранения данных при сбоях, устройствами перезапуска системы.

При выборе SCADA-систем специалисты оценивают их эксплуатационные свойства, качество сопровождения, возможность диагностики и др.

Примерами современных SCADA-систем являются:

- RSView® 32;
- Omron HMI;
- InTouch® HMI и др.

На рис. 2.7 и рис. 2.8 представлены примеры экранов SCADA-системы объектов добычи нефти.

На рис. 2.9 дан пример экрана автоматизированного рабочего места буровика, на котором отображаются основные технологические параметры процесса бурения.

Наименование	Обозначение
2. Прибор, устанавливаемый на пульте или щите: а) основное обозначение б) допускаемое обозначение	 
3. Контроллер, монитор, системный блок и др. (функциональный блок цифровой техники)	
4. Устройство противоаварийной защиты (ПАЗ) а) установленное по месту б) установленное на щите	 
5. Общее обозначение исполнительного механизма	
6. Исполнительный механизм, который при исчезновении управляющего сигнала: а) открывает регулирующий орган; б) закрывает регулирующий орган; в) оставляет регулирующий орган в неизменном положении	  
7. Исполнительный механизм с дополнительным ручным приводом	
8. Линия связи	
9. Отборное устройство	

Буквенные обозначения основных величин (измеряемых/контролируемых/регулируемых) и функциональные признаки приборов маркируются в соответствии с ГОСТ 21.208-2013 (приведены в табл. 2.3–2.5).

Таблица 2.3

Буквенные условные обозначения средств автоматизации

Обозначение	Измеряемая величина		Функциональный признак прибора		
	основное обозначение измеряемой величины	дополнительное обозначение, уточняющее измеряемую величину	отображение информации	формирование выходного сигнала	дополнительное значение
1	2	3	4	5	6
A	Анализ. Состав, качество, концентрация, т. п.	–	Сигнализация	–	–
B	Пламя, горение	–	–	–	–
C	+	–	–	Автоматическое регулирование, управление	–
D	+	Разность, перепад	–	–	Величина отклонения от заданной измеряемой величины
E	Напряжение	–	Чувствительный элемент	–	–
F	Расход	Соотношение, доля, дробь	–	–	–
G	+	–	Первичный показывающий прибор	–	–
H	Ручное воздействие	–	–	–	Верхний предел измеряемой величины
I	Ток	–	Вторичный показывающий прибор	–	–
J	Мощность	Автоматическое переключение, обегание	–	–	–

Продолжение таблицы 2.3

1	2	3	4	5	6
K	Время, временная программа	–	–	Станция управления	–
L	Уровень	–	–	–	Нижний предел изме- ряемой величины
M	+	–	–	–	Величина или среднее положение
N	+	–	–	–	–
O	+	–	–	–	–
P	Давление, вакуум	–	–	–	–
Q	Количество	Интегрирование, суммирование по времени	–	+	–
R	Радиоактив- ность	–	Регистрация	–	–
S	Скорость, частота	Самосрабатыва- ющее устройство безопасности	–	Включение, отключение, переключение, блокировка	–
T	Температура	–	–	Преобразование	–
U	Несколько разнородных измеряемых величин	–	–	–	–
V	Вибрация	–	+	–	–
W	Вес, сила, масса	–	–	–	–
X	Нерекоменду- емая резервная буква	–	Вспомога- тельные ком- пьютерные устройства	–	–

Окончание таблицы 2.3

1	2	3	4	5	6
Y	Событие, состояние	–	–	Вспомогательное вычислительное устройство	–
Z	Размер, положение, перемещение	Система инструментальной безопасности, противоаварийная защита	–	+	–

Таблица 2.4

Дополнительные буквенные обозначения, отражающие функциональные признаки приборов

Наименование	Обозначение	Назначение
Чувствительный элемент	Е	Обозначают первичные преобразователи: датчики пирометров, термопреобразователи сопротивления, преобразователи термоэлектрические, сужающие устройства расходомеров и т. д.
Преобразование	Т	Бесшкальные приборы с дистанционной передачей сигнала: манометры, манометрические термометры, дифманометры
Станция управления	К	Приборы, имеющие переключатель для выбора вида управления и устройство для дистанционного управления
Вычислительные функции	Y	Обозначают вспомогательные устройства, которые выполняют вычислительные функции

Таблица 2.5

Дополнительные обозначения, обозначающие функциональные признаки преобразователей сигналов и вычислительных устройств

Наименование	Обозначение
1. Физический вид сигнала: – электрический – пневматический – гидравлический	Е Р G
2. Вид формы сигнала: – аналоговый (непрерывный) – дискретный	A D

На рис. 2.10 представлен пример условного обозначения средства автоматизации.



Рисунок 2.10. Пример и расшифровка условного обозначения средства автоматизации










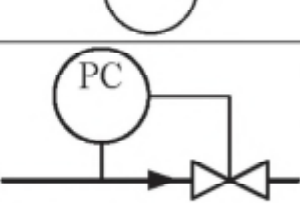





2.4. Примеры обозначения элементов автоматизации на функциональных схемах


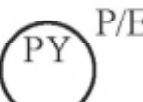



В табл. 2.6 представлены примеры обозначения средств автоматизации и дано описание их назначения.

Таблица 2.6

Примеры обозначения средств автоматизации

Обозначение	Наименование
<div>TE</div> <div>PE</div> <div>FE</div> <div>LE</div>	Установленное по месту первичное преобразовательное устройство для измерения соответственно: <ul style="list-style-type: none"> – температуры, – давления, – расхода, – уровня
<div>TG</div> <div>PG</div> <div>FG</div> <div>LG</div>	Показывающий прибор, установленный по месту для измерения соответственно: <ul style="list-style-type: none"> – температуры, – давления, – расхода, – уровня

Обозначение	Наименование
   	Устройство, преобразующее с дистанционной передачей сигнала (о температуре, давлении, расходе, уровне), установленное по месту
	Прибор регистрации данных о температуре, установленный по месту
	Прибор для измерения температуры с автоматическим обегаящим устройством, регистрирующий, установленный на щите
	Прибор, показывающий перепад давления, установленный по месту (например, дифманометр)
	Прибор для измерения давления (разрежения), показывающий с контактным устройством, установленный по месту. Например: электроконтактный манометр
	Прибор, регистрирующий давление, установленный по месту
	Регулятор давления прямого действия (для управления клапаном не используется дополнительный источник энергии)
	Прибор, измеряющий суммарный расход. Например, счетчик-расходомер с интегратором
	Прибор контроля верхнего (H) уровня, сигнализирующий с контактным устройством, установленный по месту
	Прибор измерения уровня, показывающий с сигнализацией верхнего (H) и нижнего (L) уровней, установленный по месту
 плотность	Прибор для преобразования и дистанционной передачи данных о плотности раствора, установленный по месту
 влажность	Прибор, регистрирующий данные о влажности, установленный по месту

Обозначение	Наименование
 AG^{O_2}	Показывающий газоанализатор, контролирующий содержание кислорода
 $\text{PY}^{\text{P/E}}$	Преобразующее устройство, входной сигнал пневматический, выходной – электрический, установлено по месту
 EG	Прибор измерения напряжения, установленный по месту (вольтметр)
 IG	Прибор измерения силы тока, установленный по месту (амперметр)
 JG	Прибор измерения мощности, установленный по месту (ваттметр, варметр и др.).

На рис. 2.11 представлена упрощенная функциональная схема регулирования давления в сепараторе. Системой автоматического управления осуществляется первичное преобразование величины давления РТ (поз. 1) устройством, установленным по месту. Вторичный прибор PIR (поз. 2) осуществляет регистрацию и индикацию показаний давления (самописец). Регулятор давления РС (поз. 3) осуществляет регулировку давления в сепараторе изменением проходного сечения задвижки при помощи исполнительного устройства (поз. 4). Элементы PIR и РС установлены в шкафу блока автоматики.

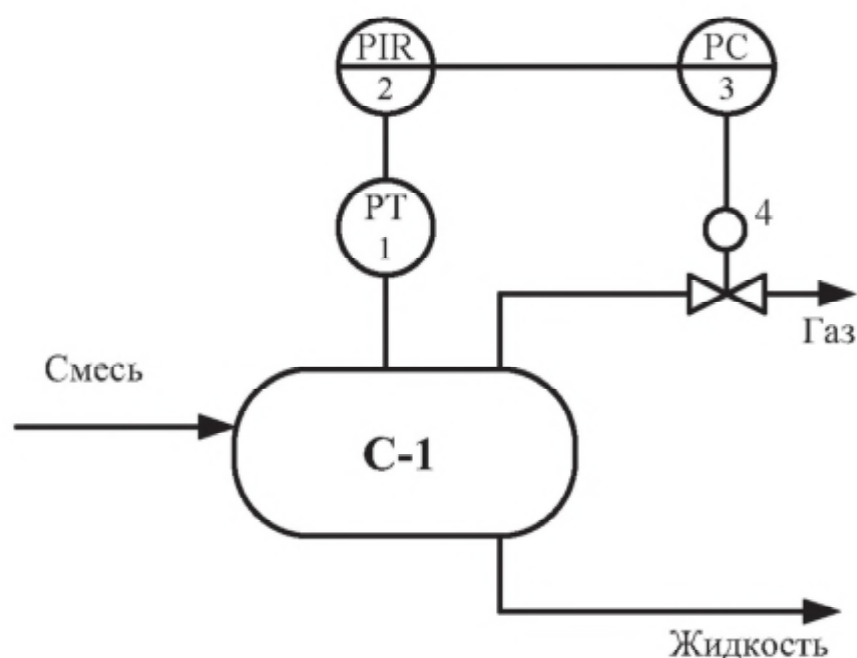


Рисунок 2.11. Упрощенная функциональная схема регулирования давления в сепараторе

На рис. 2.12 представлена упрощенная схема регулирования производительности центробежного насоса. Насос Н-1 приводится во вращение электродвигателем М с постоянной частотой вращения. Данные о расходе на выходе насоса (подача) регистрируются устройством FRC (поз. 1), которое регулирует проходное сечение задвижки посредством исполнительного механизма (поз. 2). Таким образом, регулируется подача в трубопровод.

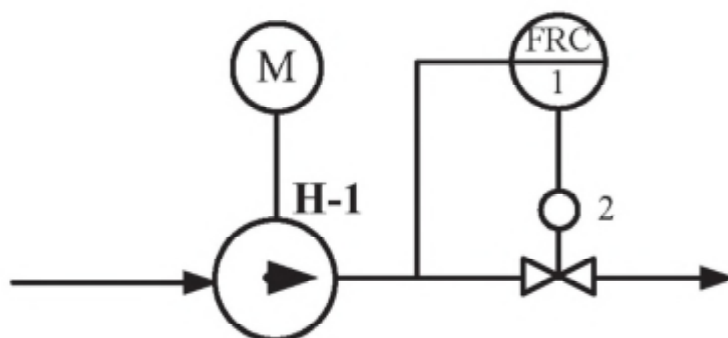


Рисунок 2.12. Упрощенная схема регулирования производительности центробежного насоса

Контрольные вопросы

1. Какие функции выполняют средства автоматизации нижнего, среднего и верхнего уровня?
2. Какие функциональные блоки выделяют у микроконтроллеров?
3. Для чего нужны SCADA-системы?

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизация технологических процессов добычи и подготовки нефти и газа : учебное пособие для вузов [Текст] / Е. Б. Андреев [и др.]. – Москва : ООО Недра-Бизнесцентр, 2008. – 399 с.
2. Гладких Т. Д. Электротехника в строительстве скважин : учебное пособие / Т. Д. Гладких. – Тюмень : ТИУ, 2017. – 180 с.
3. ГОСТ 21 208-2013 Автоматизация технологических процессов. Обозначения условные приборов и средств автоматизации в схемах [Текст]. – Взамен ГОСТ 21.404–85; введ 2014-11-01. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации; Москва : Стандартинформ, 2015. – 30 с.
4. Теория автоматического управления: учебник для вузов [Текст] / С. Е. Душин [и др.] ; под ред. В. Б. Яковлева. – Москва: Высшая школа, 2003 – 567 с.
5. Каменских И. А. Процессы и аппараты нефтяной и газовой промышленности: учебное / И. А. Каменских, В. А. Ведерников, В. А. Овчинникова ; ТюмГНГУ. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2002. – 192 с.
6. Кирюшин О. В. Управление техническими системами: курс лекций [Текст] / О. В. Кирюшин. – Уфа: Издательство УГНТУ, 2003. – 80 с.
7. Теория автоматического управления: учебник: в 2-х частях [Текст] / Под ред. А. А. Воронова. – Москва: Высшая школа, 1986. – Ч. 1. – 367 с. – Ч. 2. – 504 с.
8. Храменков В. Г. Автоматизация технологическими процессами бурения нефтегазовых скважин : учебное пособие для академического бакалавриата [Текст] / В. Г. Храменков. – Москва : Издательство Юрайт, 2017. – 415 с.