

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Ю.К. Атрошенко, Е.В. Иванова

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АЭС

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2014

УДК 621.311.25:621.039(075.8)

ББК 31.47я73

A92

Атрошенко Ю.К.

A92 Автоматизированные системы управления АЭС: учебное пособие / Ю.К. Атрошенко, Е.В. Иванова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 81 с.

В пособии приведены краткие сведения об основных понятиях теории автоматического управления, критериях устойчивости систем, методах идентификации систем управления, видах АСР на атомных электрических станциях. Подробно рассмотрены примеры решения задач, для каждой из которых приведены варианты индивидуальных заданий.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальностям 140404 «Атомные электрические станции и установки», 141403 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация, инжиниринг».

УДК 621.311.25:621.039(075.8)

ББК 31.47я73

Рецензенты

Доктор технических наук, профессор
Томского государственного университета
С.В. Шидловский

Заместитель генерального директора по эксплуатации
ЗАО «Строительно-монтажное предприятие – 95»
А.В. Качалов

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2014

© Атрошенко Ю.К., Иванова Е.В., 2014

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ	6
1.1. Общие вопросы теории управления	6
1.2. Математическое описание систем управления	10
1.3. Элементарные звенья и их соединения	13
1.4. Устойчивость автоматических систем регулирования.....	19
1.5. Определение качества регулирования.....	23
1.6. Синтез линейных автоматических систем	24
2. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АЭС.....	27
2.1. Основные понятия автоматических и автоматизированных систем	27
2.2. Общие принципы организации автоматизированного управления на АЭС	29
2.3. Система управления и защиты реактора.....	31
2.4. Автоматическое регулирование уровня воды в парогенераторе...35	
2.5. Автоматическое управление и защита турбоустановок	37
2.6. Автоматическое регулирование конденсатора.....	40
2.7. Автоматическое регулирование регенеративных подогревателей42	
2.8. Автоматическое регулирование давления в деаэраторе.....	43
2.9. Автоматическое регулирование уровня воды в деаэраторе.....	45
2.10. Автоматическое регулирование редукционно-охладительных установок	46
2.11. Общие принципы организации АСУ энергоблока.....	48
3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ	50
3.1. Дифференциальные уравнения элементов систем автоматического управления.....	50
3.2. Временные характеристики систем	53
3.3. Определение качества процесса управления.....	54
3.4. Передаточные функции звеньев и систем.....	55
3.5. Структурный анализ автоматических систем.....	56
3.6. Частотные характеристики звеньев и систем	62
3.7. Исследование устойчивости систем автоматического управления с помощью критериев Рауса и Гурвица	63
3.8. Исследование устойчивости систем автоматического управления с помощью критерия Михайлова.....	65
3.9. Параметрический синтез линейных систем регулирования корневым методом (РАФЧХ)	67

3.10. Разработка структурных схем систем автоматического регулирования	69
3.11. Разработка функциональных схем систем автоматического регулирования	76
3.12. Составление заказных спецификаций	78

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время атомные электрические станции Российской Федерации вырабатывают порядка 17 % от общего количества вырабатываемой электроэнергии. Тем не менее к 2030 г. планируется увеличить число АЭС в четыре раза.

Обеспечение безопасности и надежности атомных станций – первоочередная задача для проектировщиков, строителей и обслуживающего персонала. По критерию безопасности атомных электростанций Россия занимает второе место, опережая такие страны, как США, Великобритания и Германия.

Одной из главных составляющих в процессе организации надежной и безопасной работы АЭС являются автоматизированные системы управления и защиты технологических объектов. Такие системы выполняют множество функций: от автоматического контроля параметров технологического процесса до автоматизированного управления этими процессами и защиты оборудования АЭС.

Автоматизированные системы управления технологическими процессами позволяют увеличить эффективность работы энергоблока и вспомогательного оборудования, системы контроля предназначены для непрерывного контроля протекания технологических процессов и мониторинга безопасности и надежности работы оборудования.

При разработке и проектировании систем управления и защиты АЭС необходимо учитывать специфику технологических процессов атомных электростанций, и главным образом основного оборудования.

В настоящем пособии содержатся не только базовые сведения, касающиеся теории автоматического управления, но и рассмотрены принципы построения АСУ основным оборудованием АЭС с учетом особенностей технологических процессов.

1. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ

1.1. Общие вопросы теории управления

Теория автоматического управления отвечает на вопрос «Как нужно управлять, чтобы добиться нужного результата?». Исходя из этого, в управлении всегда присутствуют объект и субъект управления. Субъект управления чаще всего представляет собой регулятор или управляющее устройство. В основу работы регуляторов заложены различные принципы [1]. Как пример можно привести механический регулятор Уатта, предназначенный для изменения частоты вращения паровой турбины (рис. 1.1). С ростом частоты вращения шарики начинают расходиться из-за увеличения центробежной силы. Как следствие прикрывается заслонка и уменьшается количество пара, поступающего на турбину.

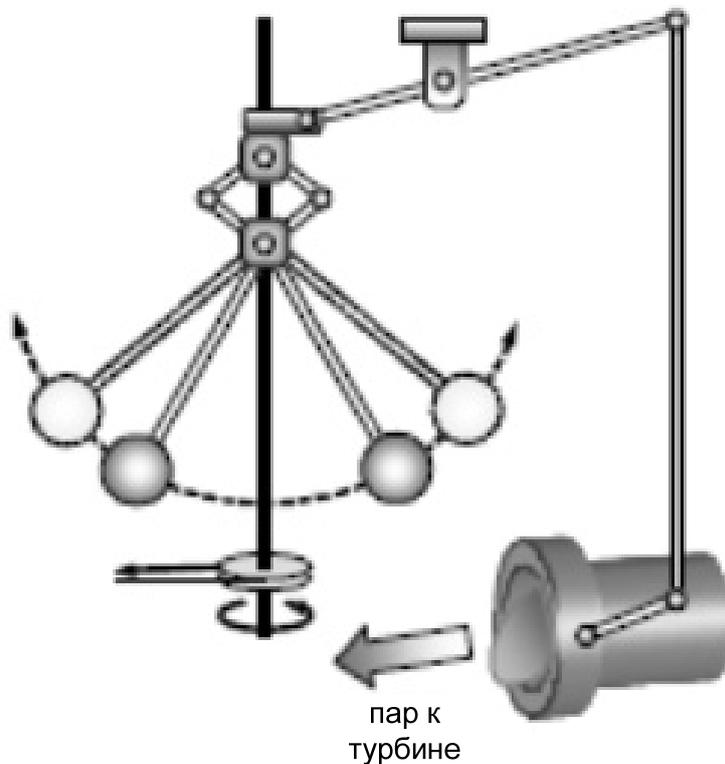


Рис. 1.1. Центробежный регулятор Уатта

Регуляторы присутствуют повсеместно не только в промышленности, но и в быту. Например, термостат в холодильнике или утюге.

В настоящее время в системах управления роль регулятора выполняют компьютеры или микропроцессорные устройства. Такие регуляторы используются в управлении полетами самолетов и космических кораблей без участия человека.

Воздействуют регуляторы на объект управления чаще всего через исполнительные механизмы, в которых может изменяться сигнал управления (электрический сигнал преобразуется в перемещение клапана).

Для того, чтобы оценить качество регулирования, необходима обратная связь, т. е. регулятор должен получать информацию о состоянии объекта. Для этого в системах управления предусмотрены датчики, измеряющие те параметры объекта, которые необходимо регулировать.

Все элементы систем автоматического управления соединены каналами связи для обмена информацией между ними. Каналы связи могут быть электрические, пневматические, гидравлические, а также их роль могут выполнять компьютерные сети.

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать вывод, что *система* – это набор элементов, объединенных каналами связи, которая приобретает особые свойства по сравнению с отдельными элементами и в любой их комбинации.

Любой объект управления не может существовать отдельно от окружающей его среды, вследствие чего на систему оказывают влияние *внешние возмущения*, которые влияют на результат регулирования. Большинство возмущений нельзя измерить или управлять ими.

В общем виде структурная схема системы управления показана на рис. 1.2.

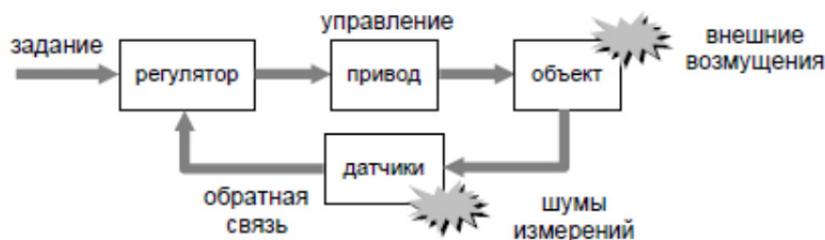


Рис. 1.2. Структурная схема системы автоматического управления

Известно два принципа управления: принцип управления по отклонению и принцип управления по возмущению [2].

В случае управления по отклонению регулирование объекта происходит на основании отклонения регулируемой величины от заданного значения, невзирая на причины, вызвавшие эти отклонения. Такие системы управления относятся к замкнутым системам.

На рис. 1.3 приведена структурная схема системы управления по отклонению.



Рис. 1.3. Структурная схема замкнутой системы

В случае управления по возмущению результат регулирования зависит от величины возмущения. Такие системы называются разомкнутыми, их структурная схема представлена на рис. 1.4.



Рис. 1.4. Структурная схема разомкнутой системы

Применение системы управления по возмущению возможно только в том случае, если эти возмущения можно измерять.

Тем не менее в разомкнутых системах компенсация всех возможных возмущений, влияющих на объект управления, практически не реализуема, т. к. многие из них нельзя измерить. На отклонение регулируемого параметра от заданного часто оказывает влияние большое количество различных возмущений (такими возмущениями могут быть изменения атмосферных условий), которые нельзя стабилизировать.

В замкнутых системах управления такой недостаток отсутствует, т. к. управление зависит от отклонения регулируемой величины без связи с причинами, его вызвавшими. Но все же в таких системах трудно добиться необходимой точности регулирования и высокого быстродействия.

В связи с этим самыми эффективными считаются комбинированные системы регулирования, в которых реализованы сразу два принципа управления. Особенностью таких систем является то, что в состав таких систем входит несколько управляющих устройств. Часть возмущений, которые можно измерить, компенсируются одним управляющим устройством, а отклонение регулируемой величины – другим (рис.1.5).



Рис. 1.5. Структурная схема системы управления с обратной связью и компенсацией возмущений

Известно большое количество классификаций систем управления, одна из которых показана на рис. 1.6.

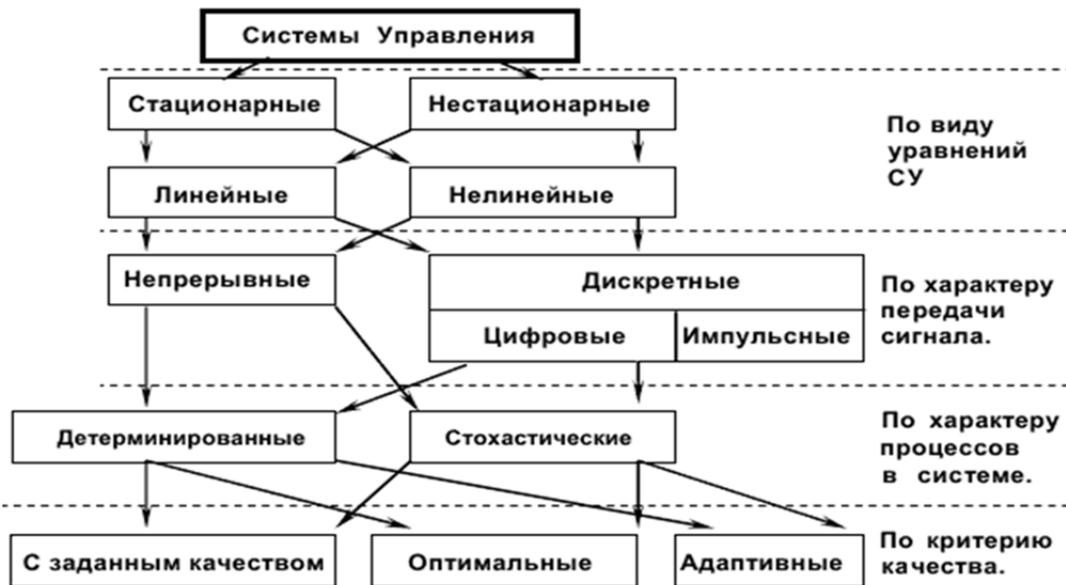


Рис. 1.6. Классификация систем управления

Закон управления есть некая зависимость, на основании которой производится управление объектом регулирования.

Наиболее распространены следующие законы управления:

1. Пропорциональный – $W(P) = k_p$ (k_p – коэффициент передачи).

2. Интегральный – $W(P) = \frac{1}{T_u P}$ (T_u – постоянная времени интегрирования).

3. Пропорционально – интегральный – $W(P) = k_p + \frac{k_p}{T_u P}$.

4. Пропорционально – интегральный – дифференциальный –

$$W(P) = k_p + \frac{k_p}{T_u P} + k_p \cdot T_D \cdot P.$$

Задачами теории управления являются:

- а) анализ системы управления;
- б) синтез системы управления.

Анализ системы управления состоит в определении устойчивости и качества системы управления при закрепленной структуре и зафиксированных значениях настроечных параметров системы.

Синтез системы управления состоит в выборе такой структуры и таких значений настроечных параметров, при которых система управления удовлетворяет заданным требованиям по устойчивости и качеству управления.

Для решения этих задач составляется математическое описание объекта управления и системы управления.

1.2. Математическое описание систем управления

Часто свойства систем управления и их отдельных элементов описывают обыкновенными дифференциальными уравнениями.

В общем виде дифференциальное уравнение для элемента системы управления записывается в виде:

$$a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1 y'(t) + a_0 y(t) = b_m x^{(m)}(t) + b_{m-1} x^{(m-1)}(t) + \dots + b_1 x'(t) + b_0 x(t) \quad (1.1)$$

Уравнение (1.1) называют уравнением движения элемента. При этом понятие «движение» употребляется в самом обобщенном смысле.

Уравнение движения может принимать линейный или нелинейный вид. Все постоянные величины, входящие в состав такого уравнения, называются параметрами.

Под временными характеристиками понимаются импульсные и переходные характеристики. Определение переходных характеристик систем классическим способом – решение дифференциального уравнения системы.

Переходной характеристикой называют реакцию системы из установившегося состояния на ступенчатое единичное входное воздействие при нулевых начальных условиях [3].

Пусть поведение системы описывается линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами

$$a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t). \quad (1.2)$$

Решение дифференциального уравнения состоит из двух составляющих:

$$y(t) = y_{св}(t) + y_{вын}(t), \quad (1.3)$$

где $y_{св}(t)$ – свободная составляющая решения; $y_{вын}(t)$ – вынужденная составляющая решения.

Вынужденная составляющая решения ищется в форме правой части уравнения (1.2):

$$y_{вын}(t) = \frac{b_0}{a_0}. \quad (1.4)$$

Свободная составляющая решения определяется видом корней характеристического уравнения системы.

Для получения характеристического уравнения необходимо перейти в уравнении (1.2) от дифференциального уравнения к изображениям Лапласа:

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} \rightarrow P^2, \quad \frac{dy(t)}{dt} \rightarrow P, \quad y(t) \rightarrow 1.$$

После замены левую часть дифференциального уравнения (1.2) нужно приравнять к нулю, тогда оно примет вид

$$a_2 P^2 + a_1 P + a_0 = 0. \quad (1.5)$$

Находятся корни решением квадратного уравнения. Вещественным различным корням характеристического уравнения системы соответствует следующая компонента свободной составляющей решения:

$$y_{св}(t) = c_1 \cdot e^{P_1 t} + c_2 \cdot e^{P_2 t}, \quad (1.6)$$

в котором P_1, P_2 находятся как корни характеристического уравнения, а c_1, c_2 – определяются из нулевых начальных условий.

В случае если корни уравнения (1.5) мнимые, свободная составляющая примет вид

$$y_{св} = (c_1 \cdot \sin(\beta \cdot t) + c_2 \cdot \cos(\beta \cdot t)) \cdot e^{\alpha \cdot t}. \quad (1.7)$$

Рассмотрим порядок определения передаточной функции по ее дифференциальному уравнению.

Пусть система описывается линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами

$$a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1 y'(t) + a_0 y(t) = b_m x^{(m)}(t) + b_{m-1} x^{(m-1)}(t) + \dots + b_1 x'(t) + b_0 x(t)$$

Применим к дифференциальному уравнению преобразование Лапласа [3]. При нулевых начальных условиях справедливы следующие формулы преобразования операций дифференцирования:

$$x'(t) \Rightarrow P \cdot X(P); x''(t) \Rightarrow P^2 \cdot X(P); \dots; x^{(m)}(t) \Rightarrow P^m \cdot X(P). \\ y'(t) \Rightarrow P \cdot Y(P); y''(t) \Rightarrow P^2 \cdot Y(P); \dots; y^{(n)}(t) \Rightarrow P^n \cdot Y(P).$$

При нулевых начальных условиях дифференциальное уравнение, преобразованное по Лапласу, записывается в виде

$$(a_n P^n + a_{n-1} P^{n-1} + \dots + a_1 P + a_0) \cdot Y(P) = (b_m P^m + b_{m-1} P^{m-1} + \dots + b_1 P + b_0) \cdot X(P).$$

Отношение изображений $Y(P)$ к $X(P)$ при нулевых начальных условиях называется передаточной функцией системы и обозначается как

$$W(P) = \frac{Y(P)}{X(P)} = \frac{b_m \cdot P^m + b_{m-1} \cdot P^{m-1} + \dots + b_1 \cdot P + b_0}{a_n \cdot P^n + a_{n-1} \cdot P^{n-1} + \dots + a_1 \cdot P + a_0}. \quad (1.8)$$

Часто при исследовании систем автоматического управления являются полезными теоремы о начальном и конечном значениях оригинала:

$$y(0) = \lim_{P \rightarrow \infty} P \cdot Y(P); y(\infty) = \lim_{P \rightarrow 0} P \cdot Y(P).$$

При воздействии $x(t) = I(t)$ на вход системы, т. е. $X(P) = 1/P$, с учетом указанной теоремы и определения передаточной функции,

$$y(0) = \lim_{P \rightarrow \infty} W(P); y(\infty) = \lim_{P \rightarrow 0} W(P).$$

Часто при описании стационарных систем управления пользуются частотными характеристиками [2]. Они нужны, чтобы можно было оценить динамические свойства системы.

Частотную передаточную функцию получают с помощью формальной замены в передаточной функции системы $W(P)$ оператора P на произведение $i\omega$. Схема замены следующая:

$$W(P) \rightarrow P = i\omega \rightarrow W(i\omega).$$

Как комплексное выражение от аргумента ω , $W(i\omega)$ можно представить двумя способами:

$$W(i\omega) = A(\omega) \cdot e^{i\varphi(\omega)};$$

$$W(i\omega) = \text{Re}(\omega) + i \cdot \text{Im}(\omega),$$

где $A(\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика системы (АЧХ); $\varphi(\omega)$ – фазочастотная характеристика (ФЧХ); $\text{Re}(\omega)$ – вещественная частотная характеристика (ВЧХ); $\text{Im}(\omega)$ – мнимая частотная характеристика (МЧХ).

Связь между различными видами частотных характеристик [3]:

$$A(\omega) = \sqrt{\text{Re}^2(\omega) + \text{Im}^2(\omega)};$$

$$\varphi(\omega) = \text{arctg} \frac{\text{Im}(\omega)}{\text{Re}(\omega)} \pm k \cdot \pi, k = 0, 1, 2, \dots;$$

$$\text{Re}(\omega) = A(\omega) \cos \varphi(\omega);$$

$$\text{Im}(\omega) = A(\omega) \sin \varphi(\omega).$$

При определении $\varphi(\omega)$ следует учитывать свойство периодичности функции arctg путем выбора значения k и знака перед ним.

1.3. Элементарные звенья и их соединения

Под звеном в теории автоматического управления подразумевают некую модель элемента или соединения элементов [2]. Часто используют типовые или элементарные звенья, передаточные функции которых имеют вид простых множителей или простых дробей.

Пропорциональное звено

По своей сути пропорциональное звено – идеальный (безынерционный) усилитель.

Пропорциональное звено описывается уравнением $y(t) = k \cdot x(t)$, переходная характеристика – рис. 1.7.

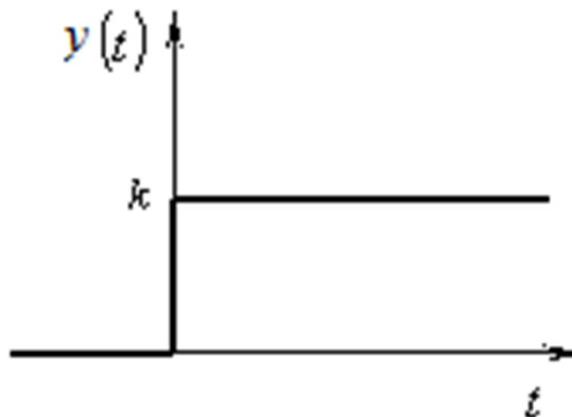


Рис. 1.7. Переходная характеристика пропорционального звена

В соответствии с преобразованием Лапласа получаем передаточную функцию $W(P) = \frac{Y(P)}{X(P)} = k$.

Заменяя оператор P на $i\omega$, получаем частотные характеристики.

$$\text{ВЧХ} - \operatorname{Re}(\omega) = k.$$

$$\text{МЧХ} - \operatorname{Im}(\omega) = 0.$$

$$\text{АЧХ} - A(\omega) = k.$$

$$\text{ФЧХ} - \varphi(\omega) = 0.$$

Интегрирующее звено

Интегрирующее звено описывается уравнением $y(t) = k_u \cdot \int_0^t x(t) dt$, переходная характеристика представлена на рис. 1.8.

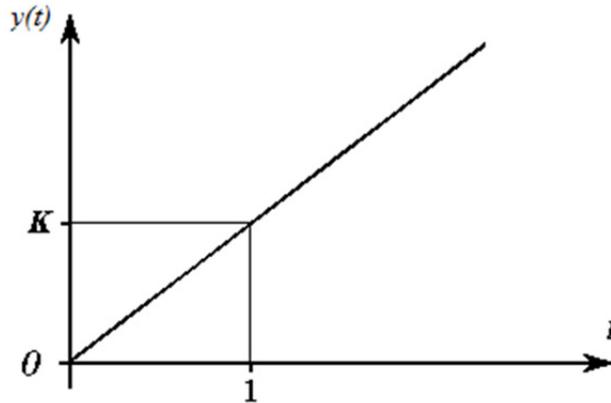


Рис. 1.8. Переходная характеристика интегрирующего звена

Передаточная функция равна $W(P) = \frac{k_u}{P}$.

Частотные характеристики для интегрирующего звена:

$$\text{ВЧХ} - \operatorname{Re}(\omega) = 0.$$

$$\text{МЧХ} - \operatorname{Im}(\omega) = -\frac{k_u}{\omega}.$$

$$\text{АЧХ} - A(\omega) = \frac{k_u}{\omega}.$$

$$\text{ФЧХ} - \varphi(\omega) = -\frac{\pi}{2}.$$

Идеальное дифференцирующее звено

Идеальное дифференцирующее звено относится к физически нереализуемым звеньям.

Идеальное дифференцирующее звено описывается уравнением $y(t) = k_D \cdot \frac{dx(t)}{dt}$, переходная характеристика – рис. 1.9.

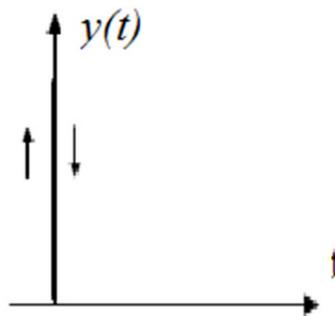


Рис. 1.9. Переходная характеристика идеального дифференцирующего звена

Передаточная функция – $W(P) = k_D \cdot P$.

Частотные характеристики:

$$\text{ВЧХ} - \operatorname{Re}(\omega) = 0.$$

$$\text{МЧХ} - \operatorname{Im}(\omega) = k_{\text{Д}} \cdot \omega.$$

$$\text{АЧХ} - A(\omega) = k_{\text{Д}} \cdot \omega.$$

$$\text{ФЧХ} - \varphi(\omega) = \frac{\pi}{2}.$$

Звено чистого транспортного запаздывания

Уравнение звена чистого транспортного запаздывания $y(t) = x(t - \tau)$, $\tau \geq 0$, переходная характеристика – рис. 1.10.

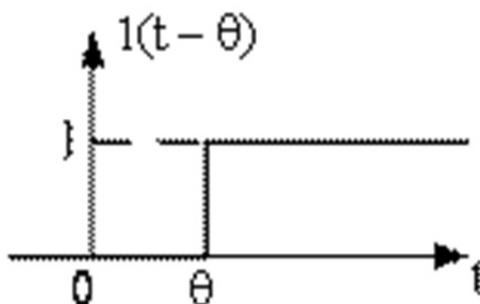


Рис. 1.10. Переходная характеристика звена запаздывания

Передаточная функция $W(P) = e^{-P\tau}$.

$$\text{ВЧХ} - \operatorname{Re}(\omega) = \cos \omega \tau.$$

$$\text{МЧХ} - \operatorname{Im}(\omega) = -\sin \omega \tau.$$

$$\text{АЧХ} - A(\omega) = 1.$$

$$\text{ФЧХ} - \varphi(\omega) = -\omega \tau.$$

Апериодическое звено

Уравнение апериодического звена – $T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k \cdot x(t)$, переходная характеристика – рис. 1.11.

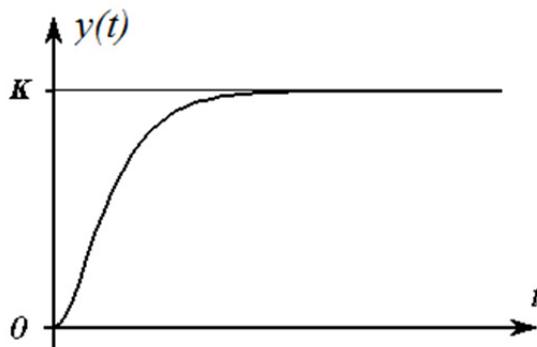


Рис. 1.11. Переходная характеристика апериодического звена

Передаточная функция $W(P) = \frac{k}{TP+1}$.

$$\text{ВЧХ} - \operatorname{Re}(\omega) = \frac{k}{T^2\omega^2 + 1}.$$

$$\text{МЧХ} - \operatorname{Im}(\omega) = -\frac{kT\omega}{T^2\omega^2 + 1}.$$

$$\text{АЧХ} - A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{1+T^2\omega^2}}.$$

$$\text{ФЧХ} - \varphi(\omega) = -\operatorname{arctg}T\omega.$$

Реальное дифференцирующее звено

Реальное дифференцирующее звено описывается уравнением $T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k \frac{dx(t)}{dt}$, переходная характеристика – рис. 1.12.

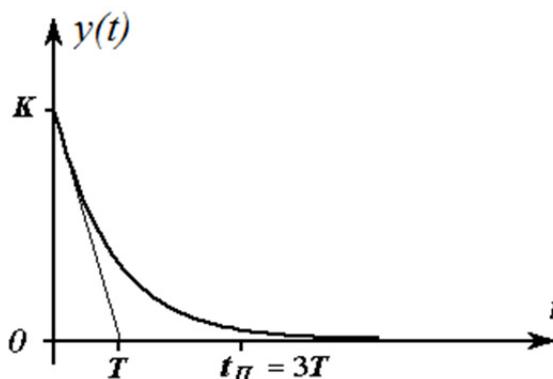


Рис. 1.12. Переходная характеристика реального дифференцирующего звена

Передаточная функция $W(P) = \frac{kT\omega}{TP+1}$.

$$\text{ВЧХ} - \operatorname{Re}(\omega) = \frac{kT^2\omega^2}{T^2\omega^2 + 1}.$$

$$\text{МЧХ} - \operatorname{Im}(\omega) = \frac{kT\omega}{T^2\omega^2 + 1}.$$

$$\text{АЧХ} - A(\omega) = \frac{kT\omega}{T^2\omega^2 + 1}.$$

$$\text{ФЧХ} - \varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{1}{T\omega}.$$

Колебательное звено

Колебательное звено описывается уравнением $T^2 \frac{d^2y}{dt^2} + 2\xi T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx$, переходная характеристика – рис. 1.13.

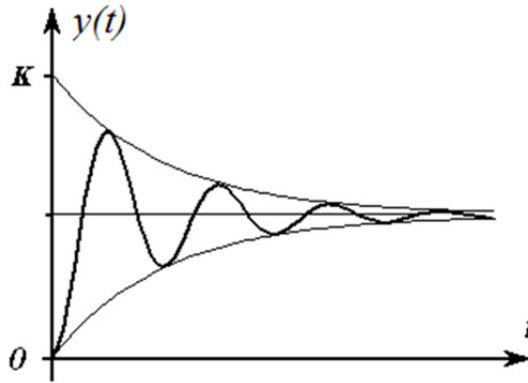


Рис. 1.13. Переходная характеристика колебательного звена

$$\text{Передаточная функция } W(P) = \frac{k}{T^2 P^2 + 2\xi TP + 1}.$$

$$\text{ВЧХ} - \operatorname{Re}(\omega) = \frac{k(1 - T^2 \omega^2)}{(1 - T^2 \omega^2) + 4\xi^2 T^2 \omega^2}.$$

$$\text{МЧХ} - \operatorname{Im}(\omega) = \frac{-2\xi T \omega k}{(1 - T^2 \omega^2) + 4\xi^2 T^2 \omega^2}.$$

$$\text{АЧХ} - A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{(1 - T^2 \omega^2) + 4\xi^2 T^2 \omega^2}}.$$

$$\text{ФЧХ} - \varphi(\omega) = -\operatorname{arctg} \frac{2\xi T \omega}{(1 - T^2 \omega^2)}.$$

Для анализа и синтеза систем автоматического регулирования (для преобразования структурных схем многоконтурных систем) пользуются структурным анализом [4].

На структурных схемах приняты специальные условные обозначения. Все элементы обозначаются в виде прямоугольников, на вход которых подается определенный сигнал. Внутри прямоугольников принято записывать передаточные функции элементов. Еще одним используемым элементом является сумматор, который нужен, если сигналы складываются или вычитаются. Сплошные линии со стрелками на конце указывают направление передачи данных в системе управления.

Звенья между собой могут быть соединены последовательно, параллельно или с обратной связью.

Звенья, соединенные последовательно, приведены на рис. 1.14.

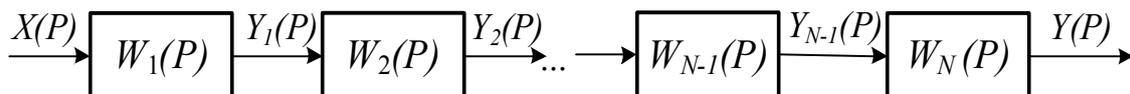


Рис. 1.14. Последовательное соединение звеньев

Рассмотрим рис. 1.14. Изображение сигнала на выходе элемента $W_1(P)$:

$$Y_1(P) = X(P) \cdot W_1(P),$$

изображение выходного сигнала элемента $W_2(P)$:

$$Y_2(P) = Y_1(P) \cdot W_2(P) \text{ или } Y_2(P) = X(P) \cdot W_1(P) \cdot W_2(P),$$

тогда изображение сигнала на выходе системы

$$Y(P) = Y_{N-1}(P) \cdot W_N(P)$$

или

$$Y(P) = X(P) \cdot W_1(P) \cdot W_2(P) \cdot \dots \cdot W_N(P). \quad (1.9)$$

Используя выражение (1.9) находим передаточную функцию системы с последовательным соединением звеньев:

$$W(P) = \frac{Y(P)}{X(P)} = W_1(P) \cdot W_2(P) \cdot \dots \cdot W_N(P). \quad (1.10)$$

Таким образом, при определении эквивалентной передаточной функции системы, состоящей из последовательно соединенных звеньев, передаточные функции звеньев перемножаются.

Рассмотрим соединение звеньев, приведенное на рис. 1.15.

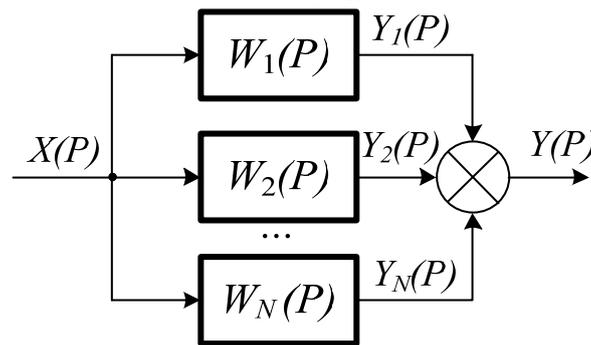


Рис. 1.15 Параллельное соединение звеньев

Изображения сигналов на выходе элементов $W_1(P)$, $W_2(P)$, $W_N(P)$ соответственно:

$$Y_1(P) = X(P) \cdot W_1(P);$$

$$Y_2(P) = X(P) \cdot W_2(P);$$

$$Y_N(P) = X(P) \cdot W_N(P),$$

тогда изображение сигнала на выходе системы

$$\begin{aligned} Y(P) &= Y_1(P) + Y_2(P) + Y_3(P) = X(P) \cdot W_1(P) + X(P) \cdot W_2(P) + X(P) \cdot W_3(P) = \\ &= X(P) \cdot [W_1(P) + W_2(P) + W_3(P)], \end{aligned}$$

откуда передаточная функция системы с параллельным соединением звеньев

$$W(P) = \frac{Y(P)}{X(P)} = W_1(P) + W_2(P) + \dots + W_N(P). \quad (1.11)$$

Таким образом, при определении эквивалентной передаточной функции системы, состоящей из параллельно соединенных звеньев, передаточные функции звеньев суммируются (рис. 1.16).

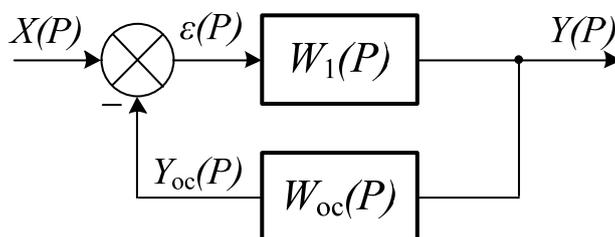


Рис. 1.16. Соединение звеньев с обратной связью

Звено $W_1(P)$ (рис. 1.16) называется охваченным обратной связью, если его выходной сигнал $Y(P)$ подается на вход через какое-либо другое звено $W_{oc}(P)$. При этом сигнал обратной связи $Y_{oc}(P)=Y(P) \cdot W_{oc}(P)$ вычитается из входного воздействия (отрицательная обратная связь): $\varepsilon(P) = X(P) - Y_{oc}(P) = X(P) - Y(P) \cdot W_{oc}(P)$ и на вход звена $W_1(P)$ поступает сигнал «рассогласования» $\varepsilon(P)$. Тогда изображение сигнала на выходе системы

$$Y(P) = \varepsilon(P) \cdot W_1(P) = (X(P) - Y(P) \cdot W_{oc}(P)) \cdot W_1(P).$$

преобразуем последнее выражение:

$$Y(P) = X(P) \cdot W_1(P) - Y(P) \cdot W_{oc}(P) \cdot W_1(P);$$

$$Y(P) + Y(P) \cdot W_{oc}(P) \cdot W_1(P) = X(P) \cdot W_1(P);$$

$$Y(P) \cdot (1 + W_{oc}(P) \cdot W_1(P)) = X(P) \cdot W_1(P);$$

$$W(P) = \frac{Y(P)}{X(P)} = \frac{W_1(P)}{1 + W_{oc}(P) \cdot W_1(P)}. \quad (1.12)$$

Выражение 1.12 определяет эквивалентную передаточную функцию при отрицательной обратной связи. В случае когда звено охвачено положительной обратной связью (сигнал обратной связи суммируется с сигналом входного воздействия), эквивалентная передаточная функция

$$W(P) = \frac{Y(P)}{X(P)} = \frac{W_1(P)}{1 - W_{oc}(P) \cdot W_1(P)}. \quad (1.13)$$

1.4. Устойчивость автоматических систем регулирования

Устойчивой считается та система, которая после исчезновения внешних воздействий может вернуться в состояние равновесия [2] (рис. 1.17).

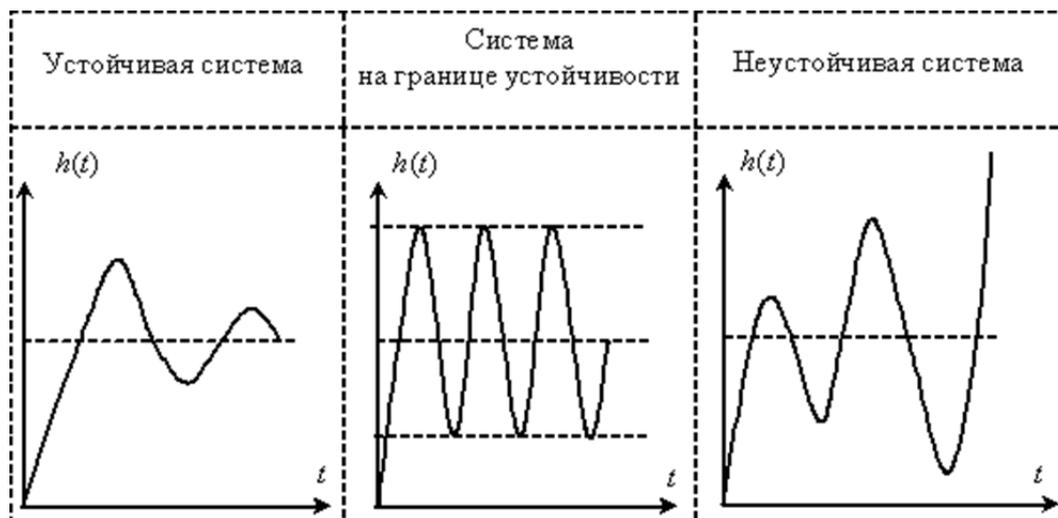


Рис. 1.17. Классификация устойчивости систем автоматического регулирования

Можно сформулировать условие устойчивости автоматических систем: для устойчивости линейной системы необходимо и достаточно, чтобы все корни ее характеристического уравнения были левыми, т. е. корни должны лежать слева от мнимой оси в комплексной плоскости.

Важное значение имеют правила, позволяющие определить устойчива система или нет, не вычисляя при этом корни характеристического уравнения. Такие правила называют критериями устойчивости.

Все критерии устойчивости делят на алгебраические и частотные.

Алгебраические критерии позволяют судить об устойчивости по коэффициентам характеристического уравнения. Наиболее распространенные из них критерии Рауса и Гурвица. Для устойчивой системы положительность коэффициентов характеристического уравнения является необходимым условием.

Критерий устойчивости Рауса

Критерий Рауса наиболее просто поясняет предложенная им табл. 1.1).

Таблица 1.1

Таблица Рауса

r	Номер строки	Номер столбца				
		1	2	3	...	K
r	—	a_n	a_{n-2}	a_{n-4}	...	a_1
	—	a_{n-1}	a_{n-3}	a_{n-5}	...	a_0
$r_1 = \frac{a_n}{a_{n-1}}$	1	$c_{11} = a_{n-2} - r_1 \cdot a_{n-3}$	$c_{12} = a_{n-4} - r_1 \cdot a_{n-5}$	$c_{13} = a_{n-6} - r_1 \cdot a_{n-7}$...	$c_{1k} = a_{n-2k} - r_1 \cdot a_{n-2k-1}$

Окончание табл. 1.1

$r_2 = \frac{a_{n-1}}{c_{11}}$	2	$c_{21} = a_{n-3} - r_2 \cdot c_{12}$	$c_{22} = a_{n-5} - r_2 \cdot c_{13}$	$c_{23} = a_{n-7} - r_2 \cdot c_{14}$...	$c_{2k} = a_{n-2k-1} - r_2 \cdot c_{1,k+1}$
$r_3 = \frac{c_{11}}{c_{21}}$	3	$c_{31} = c_{12} - r_3 \cdot c_{22}$	$c_{32} = c_{13} - r_3 \cdot c_{23}$	$c_{33} = c_{14} - r_3 \cdot c_{24}$...	$c_{3k} = c_{1,k+1} - r_3 \cdot c_{2,k+1}$
...
$r_i = \frac{c_{i-2,1}}{c_{i-1,1}}$	i	$c_{i1} = c_{i-2,2} - r_i \cdot c_{i-1,2}$	$c_{i2} = c_{i-2,3} - r_i \cdot c_{i-1,3}$	$c_{i3} = c_{i-2,4} - r_i \cdot c_{i-1,4}$...	$c_{i,k} = c_{i-2,k+1} - r_i \cdot c_{i-1,k+1}$

Из анализа приведенной таблицы легко просматривается правило составления. Процесс заполнения таблицы продолжается до тех пор, пока при заданном порядке характеристического уравнения не получится строка, содержащая один коэффициент, соответствующий свободному члену характеристического уравнения.

Автоматическая система устойчива тогда, когда все коэффициенты первого столбца таблицы Рауса положительны [3].

Если есть хотя бы один отрицательный коэффициент в первом столбце, то система неустойчива.

Критерий Гурвица

Критерий Гурвица состоит в следующем: устойчивой считается та система, для которой все определители Гурвица положительны [3]:

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & 0 & 0 \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & 0 \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & 0 \\ 0 & a_n & a_{n-2} & a_0 \end{vmatrix}.$$

Отчеркивая в определителе диагональные миноры, получим определители Гурвица низшего порядка.

Мнемоническое правило образования определителя Гурвица: первой заполняется сверху вниз главная диагональ определителя, начиная с коэффициента a_{n-1} и последовательно заканчивая коэффициентом a_0 . Ниже коэффициентов главной диагонали ставятся коэффициенты с последовательно возрастающими индексами, выше – с последовательно убывающими индексами. Взамен недостающих коэффициентов ставятся нули.

Частотные критерии позволяют судить об устойчивости системы по виду ее частотных характеристик. Такие критерии относятся к графоаналитическим и достаточно широко распространены. К ним относятся критерии Михайлова и Найквиста.

Критерий Михайлова

При применении критерия Михайлова рассматривают функцию комплексного переменного $M(i\omega)$, полученную при подстановке $p = i\omega$ в характеристический полином системы управления:

$$M(i\omega) = a_n(i\omega)^n + a_{n-1}(i\omega)^{n-1} + \dots + a_1 \cdot i\omega + a_0.$$

Об устойчивости системы судят по виду кривой, описываемой в плоскости комплексного переменного концом вектора $M(i\omega)$ при изменении ω от 0 до ∞ (годограф Михайлова).

Система n -го порядка является устойчивой, если годограф вектора $M(i\omega)$, никогда не обращаясь в нуль, проходит последовательно против часовой стрелки n квадратов, начинаясь с положительной ветви вещественной оси [3] (рис. 1.18).

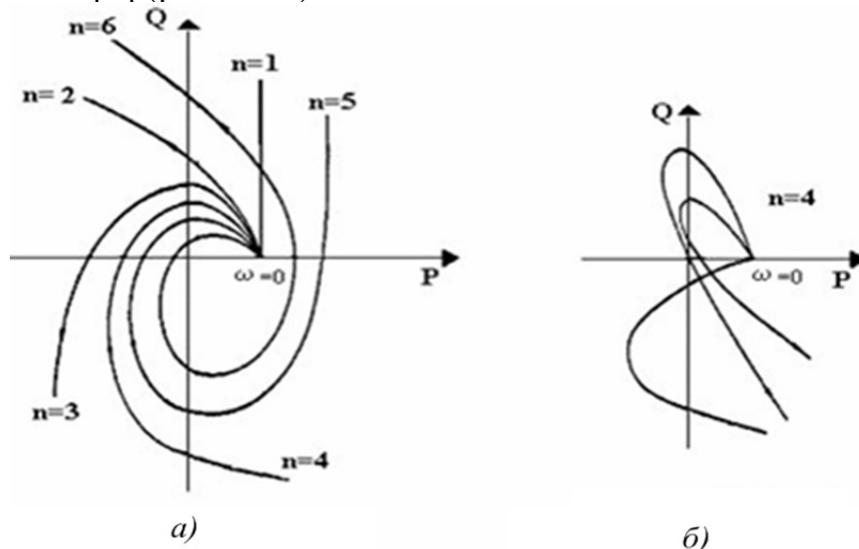


Рис. 1.18. Годографы Михайлова:
а – для устойчивых систем порядка n ; б – для неустойчивых систем

Критерий Найквиста

По этому критерию можно определить устойчивость замкнутой системы по виду амплитудно-фазочастотной характеристики для разомкнутой системы.

Система, устойчивая или нейтральная в разомкнутом состоянии, будет устойчивой в замкнутом состоянии (обратная связь отрицательна), если АФЧХ разомкнутой системы при изменении ω от 0 до $+\infty$ не охватывает в плоскости комплексного переменного точку с координатами $(-1, i0)$. Охватываемой областью является область, лежащая справа от направления роста частоты.

Система включающая неустойчивые звенья (характеристическое уравнение разомкнутой системы имеет k корней в правой полуплоско-

сти), будет устойчива в замкнутом состоянии, если АФЧХ разомкнутой системы при изменении ω от $-\infty$ до $+\infty$ охватывает точку $(-1, i0)$ k раз. Охватываемой областью является область, лежащая слева (рис. 1.19) [2].

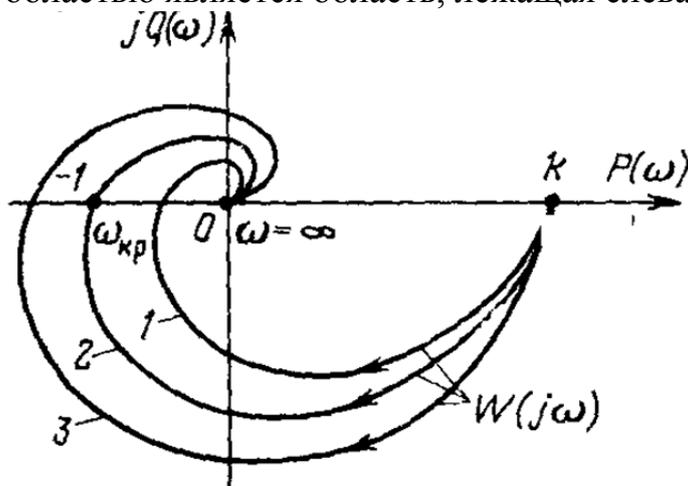


Рис. 1.19. График АФЧХ разомкнутого контура:
1 – устойчивая система, 2 – на границе устойчивости, 3 – неустойчивая

1.5. Определение качества регулирования

Ко всем автоматическим системам регулирования предъявляют определенные требования к быстродействию, колебательности, перерегулированию, точности и плавности протекания процесса [2].

Качество переходного процесса можно оценить по его свободной и вынужденной составляющим.

По виду кривой переходного процесса, полученной экспериментально или теоретически, можно судить об определенных показателях, называемых прямыми оценками качества (рис. 1.20).

Прямые оценки качества:

1) время регулирования – то время, когда регулируемая величина последний раз пересечёт пределы зоны, равной диапазону $2 \cdot \delta$, где $\delta = 0,05 \cdot y(\infty)$ – для переходного процесса, полученного по каналу задания или $\delta = 0,05 \cdot K_{об}$ – для переходного процесса, полученного по каналу возмущения;

2) перерегулирование можно найти из формул

$$\sigma = \frac{A_1}{y(\infty)} \cdot 100 \% \text{ или } \sigma = \frac{A_3}{A_1} \cdot 100 \% ;$$

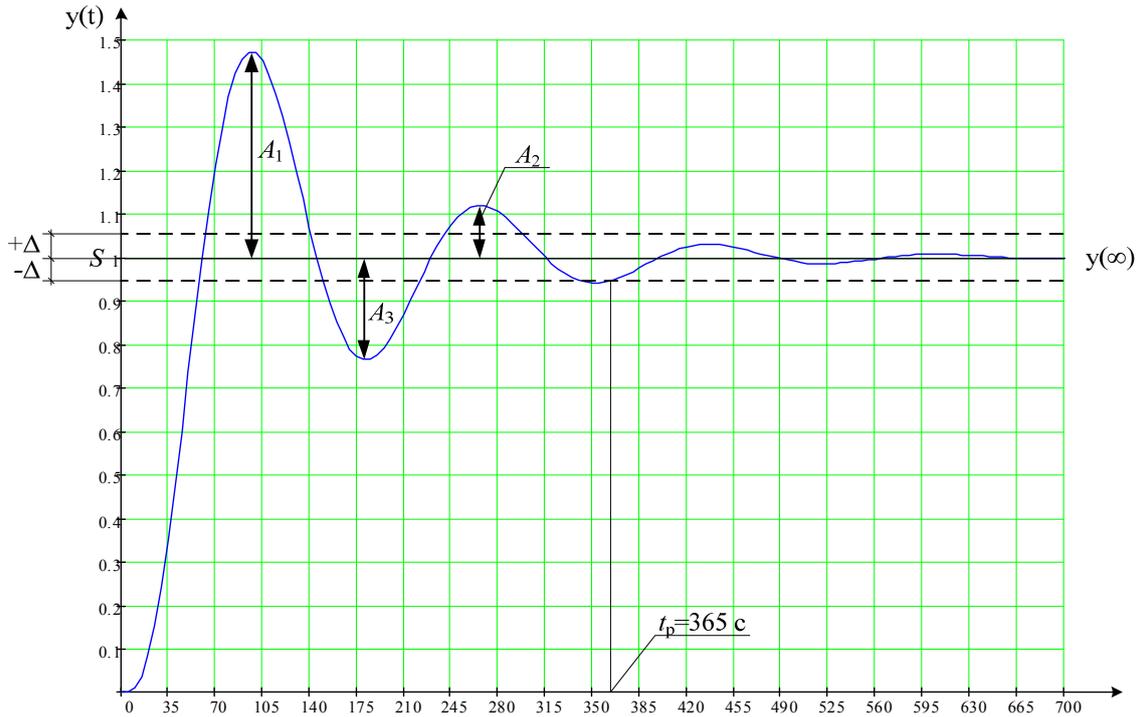


Рис. 1.20. График переходной характеристики

3) статическая ошибка – отклонение регулируемой величины от сигнала задания в установившемся режиме: $\varepsilon_{ст} = S - y(\infty)$;

4) степень затухания – интенсивность изменения регулируемой величины, с которой она приходит к установившемуся состоянию:

$$\psi = \frac{A_1 - A_2}{A_1};$$

5) максимальная динамическая ошибка – максимальное отклонение регулируемой величины от установившегося состояния A_1 .

1.6. Синтез линейных автоматических систем

При синтезе системы передаточная функция регулируемого объекта известна и требуется найти параметры настройки регулятора, чтобы они удовлетворяли заданным требованиям.

Корневой метод

Рассматриваемый корневой метод параметрического синтеза систем автоматического управления основан на понятии расширенных амплитудно-фазочастотных характеристик (РАФЧХ). РАФЧХ какого-либо звена можно получить подстановкой в передаточную функцию этого звена $W(P)$ оператора $P = -m \cdot \omega + i \cdot \omega$. Расчетные формулы обеспе-

чивают получение границы заданной степени колебательности системы в пространстве параметров настройки регулятора [5].

Структурная схема ПИ-регулятора представлена на рисунке 1.21.

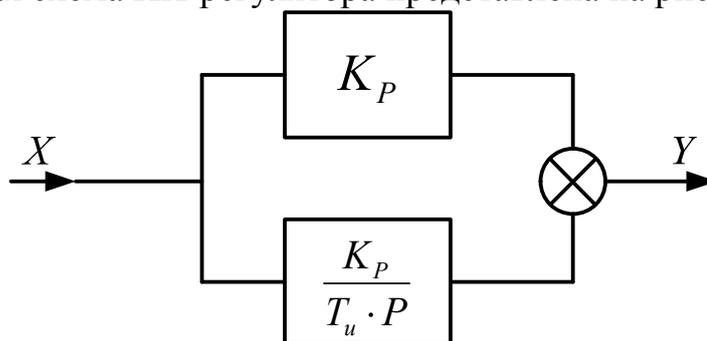


Рис. 1.21. Структурная схема ПИ-регулятора

Расчетные формулы корневого метода для ПИ-регулятора имеют следующий вид:

$$\frac{K_p}{T_u} = -\frac{\omega \cdot (m^2 + 1) \cdot \text{Im}_{об}(m, \omega)}{A_{об}^2(m, \omega)}, \quad K_p = -\frac{m \cdot \text{Im}_{об}(m, \omega) + \text{Re}_{об}(m, \omega)}{A_{об}^2(m, \omega)}.$$

Здесь и в дальнейшем: $\text{Re}_{об}(m, \omega)$ – расширенная вещественная частотная характеристика объекта; $\text{Im}_{об}(m, \omega)$ – расширенная мнимая частотная характеристика объекта; $A_{об}(m, \omega)$ – расширенная амплитудно-частотная характеристика объекта $A_{об}(m, \omega) = \sqrt{\text{Re}_{об}^2(m, \omega) + \text{Im}_{об}^2(m, \omega)}$, где ω – частота; m – заданная величина степени колебательности (табл. 1.2).

Таблица 1.2.

Таблица соответствия оценок запаса устойчивости

Ψ	0	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	0,998	1,0
m	0	0,221	0,256	0,302	0,366	0,477	0,989	∞
M	∞	2,38	2,08	1,81	1,55	1,29	1,0	1,0

Порядок применения расчетных формул следующий:

1. Задаются величиной m в зависимости от заданного значения степени затухания, диапазоном и шагом изменения частоты ω .

2. По передаточной функции объекта рассчитываются значения расширенных частотных характеристик объекта и в явном виде определяют настройки регулятора в заданном диапазоне частот.

3. Для ПИ-регулятора расчетные формулы дают в пространстве параметров настройки границу заданного запаса устойчивости.

На границе заданного запаса устойчивости ищут значения параметров настройки для регуляторов.

Метод Ротача

Сущность метода в том, что динамические свойства объекта задаются с помощью АФЧХ. Для иллюстрации метода Ротача можно привести рис. 1.22.

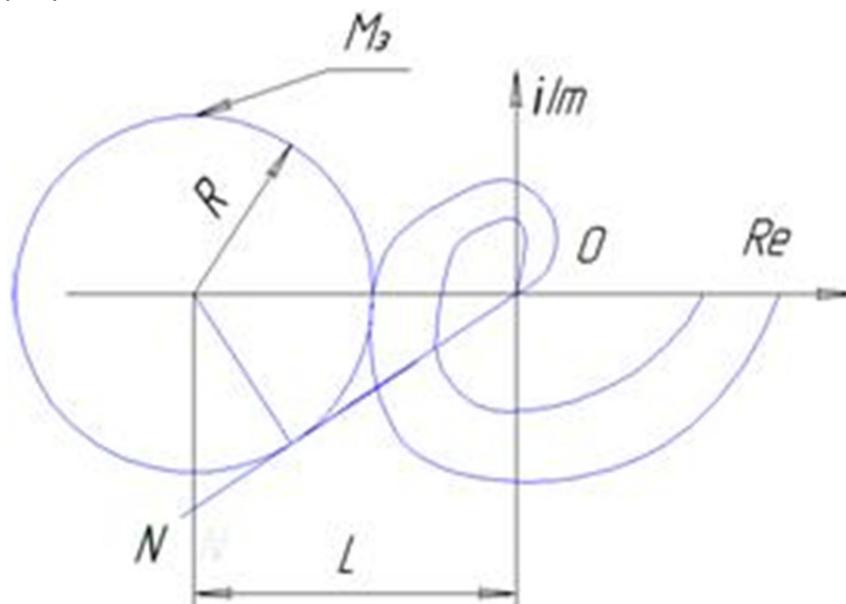


Рис. 1.22. Пример графических расчетов

Как видно, необходимо подобрать окружность с таким радиусом, чтобы она касалась и АФЧХ объекта, и луча ON под углом $\beta = \arctg \frac{1}{M}$, где M – показатель колебательности. Радиус окружности напрямую связан с основным параметром настройки регуляторов $k_p = \frac{M}{M^2 - 1} \cdot \frac{1}{r}$.

Значение M берется из табл. 1.2 по заданному значению степени затухания. Подробно поиск оптимальных параметров настройки регуляторов методом Ротача изложен в [6].

2. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АЭС

2.1. Основные понятия автоматических и автоматизированных систем

Система – совокупность нематериальных и материальных объектов, объединенных общими свойствами, признаками, назначением или условиями функционирования, которые при этом образуют единое целое.

Автоматизированная система – система, включающая в себя объект управления и технические средства автоматизации. При этом часть функций управления выполняется человеком-оператором.

Автоматическая система – система, объединяющая в себе объект управления и технические средства автоматизации, функционирующая при этом без участия человека, самостоятельно.

Вычислительной системой называется система, включающая в себя ЭВМ и ряд средств программного обеспечения, предназначенная для выполнения вычислительных операций, а также любая автоматизированная система, построенная на основе ЭВМ.

Различают следующие виды систем:

- 1) гибридная вычислительная система;
- 2) дуплексная система, система с дублированием;
- 3) система коллективного пользования;
- 4) однопользовательская система;
- 5) многопроцессорная (мультипроцессорная) система;
- 6) многотерминальная система;
- 7) децентрализованная система;
- 8) система с распределенными функциями;
- 9) автономная система;
- 10) локальная система;
- 11) адаптивная система.

Система, представляющая собой совокупность аппаратных и программных средств и предназначенная для управления технологическими объектами (оптимизации или поддержания его работы), называется системой управления.

Если скорость выполнения циклов внутрисистемных операций и процессов в автоматизированной системе выше по сравнению со скоростью процессов внешней среды, во взаимосвязи с которой система функционирует, то ее называют системой реального времени.

Автоматизированная система, обладающая обратной связью, и (или) система, для которой не предусмотрено расширение, называются замкнутыми.

Если после сбоя или отказа система способна вернуться к нормальной работе, ее называют восстанавливаемой.

Работу оператора в рамках автоматизированной системы обеспечивает комплекс программных и технических средств (предназначенных для поиска, подготовки, редактирования и выдачи необходимых данных и документов), называемый автоматизированным рабочим местом оператора (АРМ).

Автоматизированная система, предназначенная для управления различными объектами и объединяющая комплекс программных и технических средств, а также различные информационные и организационно-технологические средства, называется автоматизированной системой управления (АСУ).

Автоматическая система управления – система, представляющая собой комплекс программных и технических средств, предназначенных для воздействия на один или несколько параметров объекта управления для оптимизации или поддержания его работы в определенном режиме, при чем воздействие на процесс или объект осуществляется без участия человека. Если система работает на поддержание заданного значения той или иной регулируемой величины, то она называется системой стабилизации или следящей системой. Если функционирование системы направлено на оптимизацию определенного критерия качества управления, то она называется системой автоматической оптимизации, или системой экстремального регулирования.

Комплекс информационных, технических, технологических и программных средств (включающих в себя в том числе проектно-конструкторскую документацию), предназначенный для автоматизации процесса проектирования системы автоматизации, разработки проектно-конструкторской документации, называется системой автоматизированного проектирования (САПР).

Автоматизированные системы управления в зависимости от их назначения и объекта управления делятся:

- на автоматизированную систему управления технологическим процессом (АСУ ТП);
- автоматизированную систему управления учреждением;
- автоматизированную систему управления предприятием (АСУП);
- автоматизированную систему управления отраслью (ОАСУ).

Упрощенный порядок обработки информации в АСУ приведен на рис. 2.1. На первом этапе 1 осуществляется получение информации о состоянии объекта управления в текущий момент. Затем осуществляется первичная обработка данных 2. На основании полученных данных

производится определение параметров объекта управления с учетом возмущений 3. При сравнении текущих значений параметров с заданными 4 осуществляется оценка величины рассогласования 5. После этого производится определение возможных вариантов действия системы для достижения цели управления 6. Затем принимается решение о выборе варианта решения 7 и выработка управляющего воздействия 8, выполняемого органами управления 9.

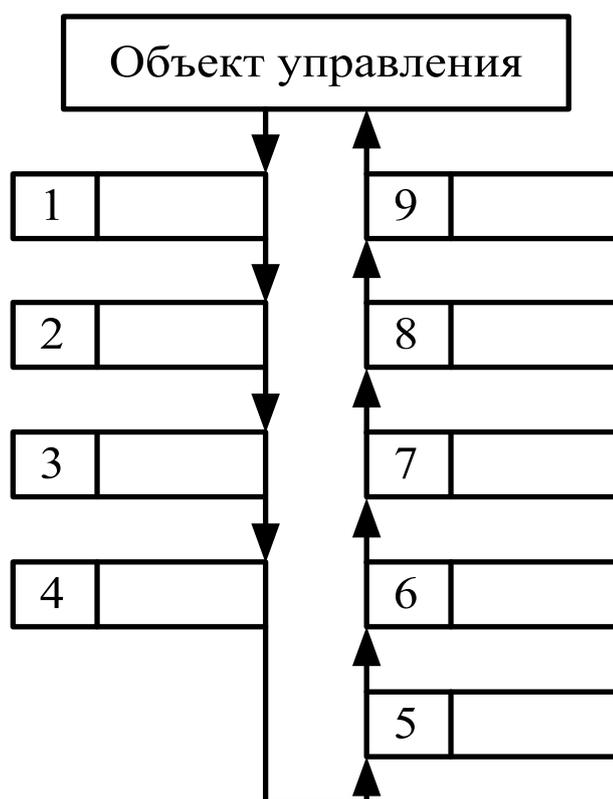


Рис. 2.1. Порядок обработки информации в АСУ ТП

2.2. Общие принципы организации автоматизированного управления на АЭС

Автоматизация работы основного и вспомогательного оборудования АЭС преследует главным образом следующие цели:

- повышение экономичности эксплуатации оборудования за счет поддержания оптимальных параметров в стационарных и переходных режимах работы с учетом изменения характеристик оборудования;
- упрощение эксплуатации основного и вспомогательного оборудования в пусковых и переходных режимах работы, уменьшение расхода энергии при выполнении пусковых операций;

- повышение надежности и готовности оборудования за счет уменьшения вероятности ошибочных действий персонала;

- оптимизация эксплуатации оборудования путем правильного решения задачи оптимального распределения нагрузок между агрегатами.

Причем решение перечисленных задач должно производиться с учетом особенностей, связанных со спецификой АЭС и требующих высокой степени автоматизации:

- необходимость обеспечения радиоактивной безопасности персонала АЭС и окружающей среды;

- ограничения доступности ряда помещений и агрегатов, в том числе теплоэнергетического оборудования, используемого в одноконтурных схемах;

- повышенные требования к надежности работы ряда основных и вспомогательных систем с целью уменьшения количества резервируемых агрегатов крупных энергоблоков.

Автоматизированные системы управления технологическими процессами атомных электростанций предназначены для реализации двух основных видов задач: информационных и управляющих. Информационные функции включают в себя сбор первоочередных данных, их обработку и выдачу информации оператору о протекании технологического процесса и состоянии оборудования, диагностику повреждений оборудования и определение технико-экономических показателей. Помимо автоматического управления оборудованием в установившихся и переходных режимах, в них входит автоматическое регулирование и оптимизация технологических процессов.

По принципам организации, в соответствии с принятой в настоящее время классификацией, АСУ ТП АЭС могут быть разделены на три основные группы:

- централизованные АСУ на базе управляющих ЭВМ, которые, помимо информационных функций, реализуют функции непосредственного управления технологическими процессами;

- децентрализованные системы функционально-группового управления, реализующие технологические процессы, выполняемые той или иной группой оборудования и механизмов;

- гибридные системы, использующие функционально-групповую автоматику и ЭВМ. Последние могут использоваться как в качестве высшей ступени иерархии, так и в отдельных функциональных группах [7].

2.3. Система управления и защиты реактора

Основное назначение системы управления и защиты (СУЗ) реактора заключается в непрерывном контроле хода цепной реакции в реакторе и управлении указанным процессом в следующих режимах: первичная загрузка или перегрузка топлива, пуск реактора на мощность и его вывод, работа на заданной мощности и ее изменение, аварийный или плановый останов реактора.

В установившемся режиме работы мощность реактора должна быть равна заданному значению, при этом реактивность должна быть равна нулю, а коэффициент размножения – единице. Тем не менее на практике происходит изменение реактивности из-за температурного эффекта, возникающего вследствие изменения температуры теплоносителя и топлива. В случае изменения уровня мощности изменяется равновесие и максимальное отравление ксеноном, и при длительной работе реактора выгорает топливо, происходит накопление шлаков. Все это приводит к изменению коэффициента размножения.

Система управления должна обеспечивать компенсацию всех изменений реактивности, вызываемых указанными причинами, при чем переходный процесс в системе должен соответствовать заданным требованиям при воздействии определенных возмущений.

В качестве управляющих воздействий здесь могут использоваться:

- изменение поглощения нейтронов;
- изменение утечки нейтронов;
- введение или выведение топлива в активную зону.

Наиболее распространенным в современных реакторах является метод поглощения нейтронов. При этом поглотители могут быть как твердыми (стержни), так и жидкими – растворенными в теплоносителе.

В состав АСР мощности реактора входят:

- автоматический регулятор;
- система контроля мощности реактора;
- органы управления.

В зависимости от способа формирования сигнала, характеризующего мощность, различают следующие типы АСР:

- АСР тепловых параметров;
- АСР плотности нейтронного потока;
- комбинированные АСР.

Следует отметить, что плотность нейтронного потока характеризует тепловую мощность энергетического реактора с точностью до 8 %.

Более точным методом определения мощности реактора является способ определения мощности по расходу теплоносителя G и разности температур теплоносителя на входе и выходе Δt :

$$N_p = G \cdot C_p \cdot \Delta t, \quad (2.1)$$

где C_p – изобарная теплоемкость среды.

Описанный способ обладает высокой статической точностью, но имеет большую инерционность. Поэтому для кипящих реакторов в качестве сигнала, характеризующего мощность, может использоваться давление пара, изменение которого говорит о небалансе производимой и потребляемой энергии.

Необходимо отметить, что при малых мощностях сигналы, характеризующие теплотехнические параметры, не используются, АСР функционируют по сигналам ионизационных камер. Однако из-за влияния содержания борной кислоты в теплоносителе, температуры ионизационной камеры и распределения энерговыделения по объему активной зоны пропорциональный коэффициент между мощностью реактора и сигналом ионизационных камер со временем изменяется. В связи с этим при больших уровнях мощности управление осуществляется по теплотехническим параметрам или применяются комбинированные схемы АСР.

При управлении мощностью реактора по нейтронному потоку периодически требуется корректировка заданного значения тока камер в зависимости от действительной тепловой мощности реактора.

В зависимости от способа регулирования пространственного распределения мощности различают:

- АСР локальной мощности;
- АСР интегральной мощности;
- комбинированные АСР.

Выбор структуры АСР мощности реактора определяется рядом причин: конструкцией и назначением реактора, его динамическими свойствами и свойствами энергоблока в целом, технологической схемой энергоблока, возмущающими воздействиями, режимом работы энергоблока.

Структурная схема АСР интегральной плотности нейтронного потока приведена на рис. 2.2.

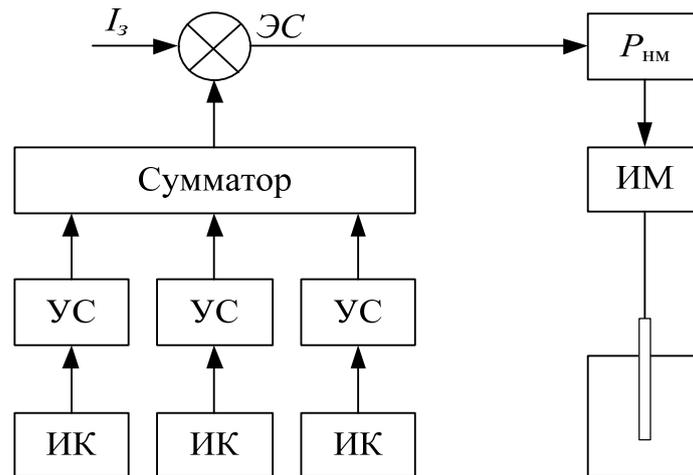


Рис. 2.2. АСР интегральной плотности нейтронного потока:
 ИК – ионизационные камеры; УС – усилители сигнала; $P_{\text{нм}}$ – регуляторы;
 ИМ – исполнительный механизм; ЭС – элемент сравнения

Сигнал I , характеризующий действительный ток камеры, от ионизационных камер I , усиленный средствами контроля нейтронного потока 2 , через сумматор поступает к элементу сравнения ЭС. Элемент сравнения вырабатывает сигнал, пропорциональный соотношению

$$U = \frac{I - I_3}{I_3} = \frac{N - N_3}{N_3}, \quad (2.2)$$

где I_3 – заданный ток камеры; N – действительная плотность нейтронов; N_3 – заданная плотность нейтронов.

Выходной сигнал элемента сравнения определяется выражением

$$\ln I - \ln I_3 = \ln \frac{I}{I_3} = \ln \left(1 + \frac{I - I_3}{I_3} \right) \approx \frac{I - I_3}{I_3}. \quad (2.3)$$

Сигнал, определяемый выражением (2.3), поступает к регулятору $P_{\text{нм}}$, вырабатывающему сигнал управления исполнительным механизмом ИМ, после чего исполнительный механизм перемещает управляющие стержни. В общем случае регулирование плотности нейтронного потока осуществляется с помощью интегрального закона регулирования (совместно с исполнительным механизмом).

АСР мощности реактора входит в АСУ энергоблоком и играет подчиненную роль, т. е. ее работа определяется режимом работы энергоблока в целом.

Для оперативного прекращения цепной реакции в реакторе в аварийных ситуациях [в которых существует вероятность разрушения тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) и выхода продуктов деления во вне-реакторное пространство] существуют специальные системы – системы аварийной защиты реактора.

Разрушение ТВЭЛ происходит в случаях:

- пережога, возникающего вследствие превышения мощности допускаемого предела или ухудшения теплоотвода, возникающего вследствие разрыва контура, отключения насосов;
- если скорость изменения мощности превышает допустимые пределы.

Быстрое прекращение цепной реакции деления ядер топлива при отклонении одного из контролируемых параметров от допустимого значения в реакторе позволяет предотвратить аварийные ситуации. Поэтому нейтронная мощность и скорость ее изменения в реакторе, а также определенные технологические параметры непрерывно контролируются в любых режимах работы реактора.

Контролируемые параметры выбираются в зависимости от степени полноты и достоверности информации о состоянии реактора, определяемой этими параметрами. В этом качестве могут быть использованы следующие технологические параметры:

- температура или давление первого контура;
- расход теплоносителя.

Останов реактора производится в случае отключения питания главных циркуляционных насосов, питания на щите системы управления и защиты.

В случаях, когда непосредственное измерение необходимых параметров (локальные тепловые потоки от ТВЭЛ к теплоносителю; скорости теплоносителя в ТВС; температура ядерного топлива и оболочки) в действующем реакторе невозможно, их значения определяются косвенным путем.

Обеспечение надежности работы системы управления и защиты реактора осуществляется за счет:

- применения надежных основных и резервных источников питания;
- дублирования каналов;
- применения специальных принципов проектирования автоматизированных систем.

Управляющие или защитные воздействия в системах аварийной защиты реактора определяются возникающими нарушениями или опасностью. Некоторые аварии (например, увеличение плотности нейтронов) предотвращаются оперативным снижением реактивности. В случае возникновения аварий, возникающих вследствие технологических нарушений (например, разрыв трубопроводов первого контура), аварийную защиту дополняют системой аварийного охлаждения зоны.

Рассмотрим системы защит энергетического реактора типа ВВЭР-1000.

Аварийная защита (АЗ) срабатывает в случае одновременного падения всех органов регулирования до крайнего нижнего положения. При этом действие системы АЗ не прекращается.

Предупредительная защита (ПЗ) в зависимости от типа вызывает поочередное движение групп стержней, начиная с рабочей, вниз с рабочей скоростью, при этом ликвидация сигнала причины срабатывания защиты приводит к отмене команды (тип ПЗ-1). ПЗ-2 запрещает движение стержней вверх до исчезновения сигнала причины срабатывания защиты.

Технические средства и электрооборудование АЗ и ПЗ разделены на независимые комплексы: два комплекса АЗ и один комплекс ПЗ. Причем комплексы размещаются в различных помещениях.

Выработка сигналов АЗ и ПЗ производится по принципу два из трех, т. е. на щит управления подается светозвуковой сигнал о срабатывании одного или двух приборов, если второй прибор при этом отказал.

Для систем АЗ и ПЗ предусматривается возможность апробации систем без воздействий на объект управления [8].

2.4. Автоматическое регулирование уровня воды в парогенераторе

Цель регулирования питания парогенератора заключается в поддержании материального баланса между количеством питательной воды, отбираемого пара, а также количеством продувочной воды. При этом показателем, характеризующим материальный баланс парогенератора, является уровень воды.

Превышение номинального уровня воды приводит к затоплению и нарушению работы сепараторов, что может привести к попаданию воды в турбину. Снижение уровня может привести к повреждению поверхностей нагрева. Поэтому к АСР уровня в парогенераторе предъявляются жесткие требования. Например, для парогенератора, работающего в составе энергоблока с ВВЭР-1000, номинальный уровень равен 2450 мм от внутренней образующей корпуса. При этом максимально допустимое отклонение в установившихся режимах работы составляет ± 50 мм от номинального, в динамических режимах – ± 150 мм номинального уровня.

Влияние на уровень парогенератора оказывают:

- изменение нагрузки (изменение расхода пара);
- изменение температуры питательной воды;
- изменение расхода питательной воды;
- изменение расхода продувочной воды;

- изменение средней температуры первого контура и отключение главных циркуляционных насосов (ГЦН).

При изменении расхода пара или отключении ГЦН в первоначальный момент времени изменение уровня происходит в сторону, не соответствующую знаку возмущения. Связано это с тем, что, например, при уменьшении расхода пара давление в парогенераторе возрастает, количество и объем пузырьков пара уменьшается, что приводит к снижению уровня. Затем уровень начинает увеличиваться, т. к. расход пара уменьшился при прежнем расходе питательной воды. Отключение ГЦН связано с резким снижением теплоотвода в парогенераторе, вследствие чего интенсивность кипения уменьшается, что вызывает снижение уровня в первоначальный момент. Тем не менее уменьшение интенсивности парообразования вызывает снижение давления и в дальнейшем уровень увеличивается, т. к. расход питательной воды не изменился.

Описанные динамические свойства парогенераторов оказывают негативное влияние на работу системы регулирования уровня. Поэтому для построения АСР уровня в парогенераторе не могут быть использованы одноконтурные системы регулирования.

Наилучшее качество регулирования дает 3-импульсная АСР уровня в парогенераторе. Принципиальная схема АСР приведена на рис. 2.3.

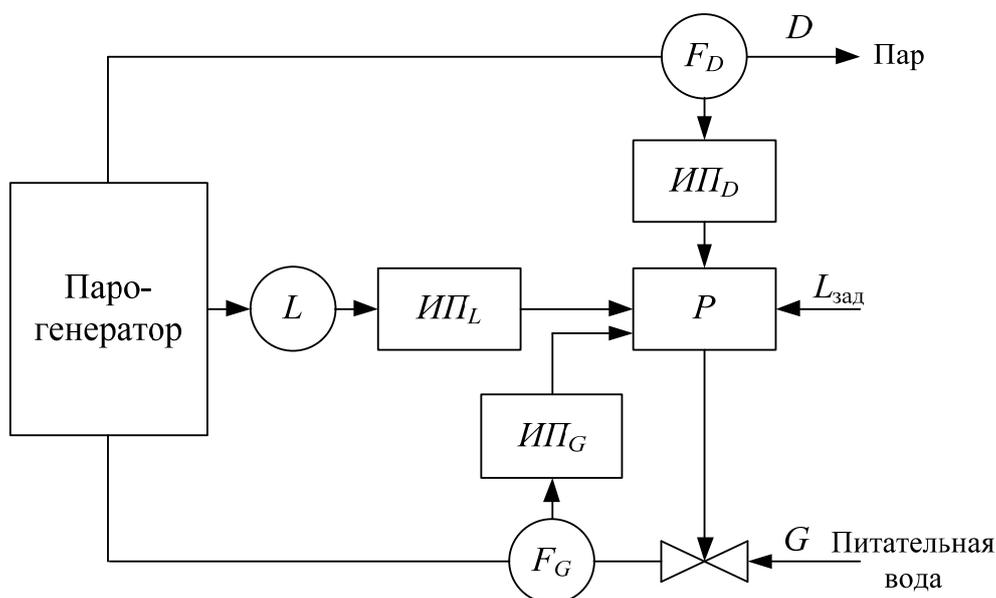


Рис. 2.3. Принципиальная схема АСР уровня в парогенераторе:
 L – первичный преобразователь уровня; F_D – первичный преобразователь расхода пара; F_G – первичный преобразователь расхода питательной воды;
 $ИП_L$ – измерительный преобразователь уровня;
 $ИП_D$ – измерительный преобразователь расхода пара;
 $ИП_G$ – измерительный преобразователь расхода питательной воды;
 P – регулятор; $L_{зад}$ – задание значения уровня

В трехимпульсной схеме в качестве импульсов используются сигналы по расходу пара, расходу питательной воды и уровню воды в парогенераторе, измеряемые соответствующими датчиками ИП_D, ИП_G и ИП_L. При изменении одной из измеряемых величин регулятор Р вырабатывает сигнал, изменяющий расход питательной воды в сторону сохранения материального баланса и поддержания заданного значения уровня.

Регулирующим устройством Р совместно с исполнительным механизмом вырабатывается пропорционально-интегральный закон регулирования. При этом импульс по расходу питательной воды позволяет сформировать пропорциональный закон регулирования и стабилизировать расход питательной воды, что способствует устранению колебаний уровня при изменении перепада давлений на регулирующем органе [8, 9].

2.5. Автоматическое управление и защита турбоустановок

Основной задачей системы регулирования паровой турбины является автоматическое поддержание на заданном уровне параметров электрической и тепловой энергии, отпускаемой потребителю. При этом отклонение контролируемых параметров не должно превышать допустимых значений при изменениях нагрузки турбины в пределах ее расчетной мощности. Кроме того, система управления и защиты должна предохранять турбину от возможных аварийных режимов, дублируя наиболее важные органы защиты.

В соответствии с источником [10] к системе управления и защиты турбоустановок предъявляются следующие требования:

- постоянство электрической и тепловой нагрузки;
- устойчивое удержание турбины на холостом ходу с номинальной частотой вращения ротора при номинальных и пусковых параметрах пара;
- обеспечение плавного изменения электрической и тепловой нагрузки путем воздействия на механизм управления турбины и на электрогидравлическую приставку;
- поддержание частоты вращения ротора турбины ниже уровня настройки срабатывания автомата безопасности при мгновенном сбросе нагрузки до нуля (в том числе при отключении генератора от сети), соответствующей максимальному расходу пара при номинальных параметрах.

Для сохранения мощности на неизменном уровне, при изменении частоты, в системе управления кроме элементов автоматического управления, предусматривается дополнительное устройство, которое позволяло бы в определенных пределах поддерживать нагрузку турбины. Необходимость изменения частоты вращения возникает также при подготовке к включению генератора в сеть, в этом случае производится его синхронизация. Поэтому система регулирования содержит органы управления – механизм управления турбиной (МУТ) или синхронизатор.

Конструктивное устройство МУТ может быть различным. Однако, независимо от конструкции МУТ, его действие заключается в смещении статической характеристики системы регулирования параллельно самой себе, что позволяет изменять мощность от нуля до номинальной при работе турбины на электрическую сеть или менять в широких пределах частоту вращения турбины.

Включение турбоагрегата в параллельную работу (синхронизация) производится, как правило, на холостом ходу в тот момент, когда ЭДС генератора совпадает по значению и по фазе с напряжением сети. Для этого после пуска турбины оператор щита управления, воздействуя с помощью электропривода на МУТ, изменяет частоту вращения турбины до тех пор, пока частота включаемого генератора не станет близкой к частоте сети. Тогда, руководствуясь показаниями синхроскопа, оператор включает генератор в сеть. Непосредственно после включения на турбоагрегат принимается небольшая начальная нагрузка. Дальнейшее увеличение нагрузки производится с учетом требований инструкции по эксплуатации турбоагрегата, а также в зависимости от условий прогрева турбины.

Отличительными особенностями современных влажнопаровых турбин АЭС как объектов регулирования являются характер течения влажного пара в этих турбинах и сравнительно низкие начальные параметры свежего пара.

Турбины АЭС характеризуются большим объемным расходом пара по сравнению с турбинами ТЭС. Кроме того, все турбины АЭС имеют промежуточные выносные сепараторы-пароперегреватели. Вследствие чего в паровом тракте турбин аккумулируются большие массы воды и объемы пара, что резко повышает инерционность протекающих в таких турбинах процессов по отношению к управляющему воздействию парораспределительных органов.

Для того чтобы учесть влияние паровых объемов и водяных масс на динамические свойства турбоагрегатов, необходимо с достаточной степенью точности определять количество воды на различных участках пароводяного тракта турбины в различных режимах работы, а также скорость парообразования (или конденсации) при различных изменениях давления пара, вызванных изменением расхода пара на турбину.

Точный учет влияния паровых объемов и водяных масс на динамические свойства турбоагрегатов становится еще более необходимым по мере роста единичной мощности турбины АЭС. При этом динамические характеристики турбины определяют схему расположения парораспределительных органов, которые вследствие их значительных размеров играют существенную роль в общей компоновке всего энергоблока.

Большое значение для турбин АЭС имеет точный расчет заброса частоты вращения при сбросе нагрузки и выбор конструкции и числа (места расположения) парозапорных органов на паропроводах промперегрева. При этом, в зависимости от определенных условий (энтальпия пара, паровых и водяных объемов в тракте), а также от допустимого заброса частоты вращения, необходима установка на каждой нитке паропровода после промперегрева как стопорных, так и регулирующих клапанов, управляемых независимыми системами защиты и регулирования, или установка только стопорных (отсечных) парозапорных органов, которые могут управляться либо только системой защиты, либо системой управления.

Основные требования к системам управления и защиты турбин АЭС заключаются в обеспечении надежной и безаварийной работы турбин во всем диапазоне эксплуатационных режимов.

Режимы работы турбин АЭС можно подразделить на установившиеся (стационарные) и неустойчивые (нестационарные). К первой группе относятся те режимы, при которых турбина работает с постоянными параметрами или параметрами, которые медленно и незначительно изменяются по сигналу оператора или управляющей машины в соответствии с диспетчерским графиком за достаточно большой промежуток времени. Ко второй группе относятся режимы работы турбины, связанные с большим изменением расхода пара: режима пуска, останова, синхронизации, сброса и заброса загрузки.

Пусковым режим для влажнопаровых турбин АЭС является наиболее продолжительным из всех нестационарных режимов работы турбин.

Для управления этим и другими режимами применяется регулятор скорости, называемый всережимным регулятором. Он включается в самом начале разворота турбины и обеспечивает поддержание заданной частоты вращения на всем протяжении процесса пуска турбины.

Из аварийных режимов работы наиболее тяжелыми считаются режим сброса нагрузки и режим отработки аварийных сигналов от энергосистемной автоматики. В последнем режиме, связанном с поддержанием устойчивости энергосистемы, от турбоагрегата требуется быстрая нагрузка и подъем нагрузки, определяемые импульсными характеристиками.

Большие паровые и водяные объемы, расположенные по тракту турбины, обуславливают значительную инерционность турбины как объекта управления. В таком случае для получения необходимых импульсных характеристик регулирующие парозапорные органы устанавливаются после каждого значительного парового или водяного объема. Это существенно усложняет систему регулирования и компоновку турбоагрегатов.

АСР давления пара перед турбиной АЭС функционирует совместно с работой системы управления реактором, воздействующей на регулирующие клапаны турбины по интегральному закону через механизм управления турбиной [11].

2.6. Автоматическое регулирование конденсатора

В конденсаторе необходимо поддерживать уровень воды постоянным, несмотря на то, какова нагрузка турбины. Изменение уровня может существенно повлиять на работу всей системы, так, например, низкий уровень приводит к кавитации конденсационных насосов, а высокий – к затоплению части теплообменной поверхности и к ухудшению теплообмена и экономичности энергоблока. Для стабилизации уровня используют единственно возможный способ регулирования – изменение производительности конденсатных насосов при помощи регулирующего клапана 1 [8] (рис. 2.4), который устанавливают после конденсатных насосов 2 и охладителей пара эжекторов 3. Но если нагрузка турбины снизится и расход конденсата уменьшится, тогда нарушается работа не только конденсатных насосов, но и холодильников пара эжекторов, а это может привести к потере вакуума в конденсаторе. Чтобы этого избежать, применяют трехходовой клапан в линии рециркуляции 4, которая необходима для сброса конденсата обратно в конденсатор.

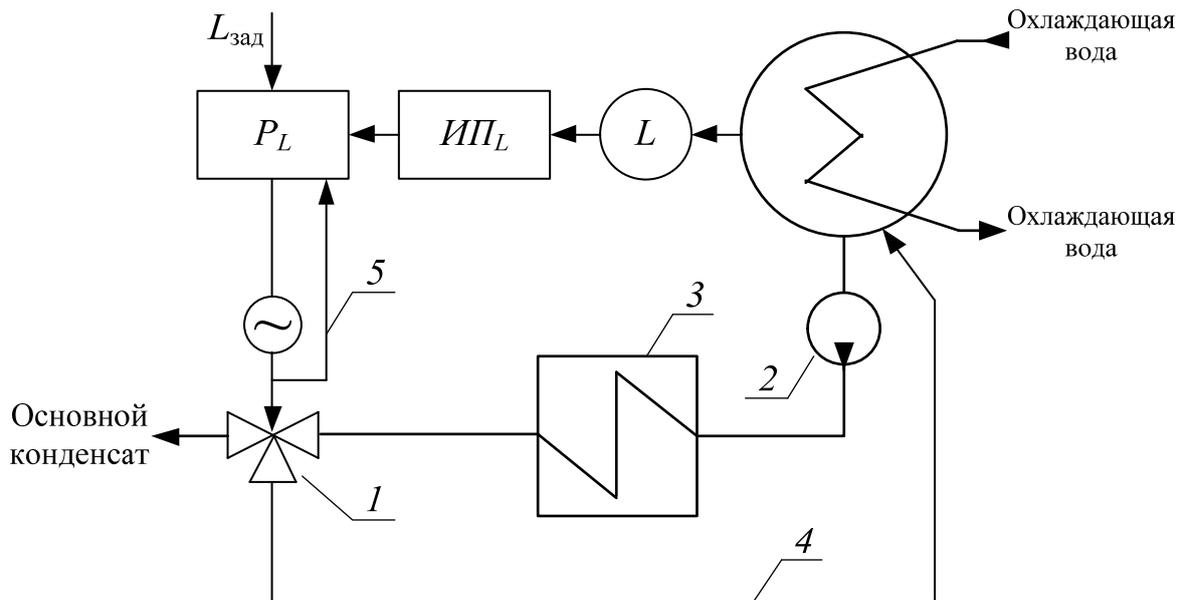


Рис. 2.4. Принципиальная схема АСР уровня в конденсаторе турбины:
 1 – регулирующий клапан; 2 – конденсатный насос; 3 – охладитель пара эжекторов;
 4 – линия рециркуляции; 5 – обратная связь по положению регулирующего органа;
 L – первичный преобразователь уровня; ИП_L – измерительный преобразователь уровня;
 P_L – регулятор уровня; L_{зад} – задание значения уровня

В работе линии рециркуляции возможны два варианта. Первый вариант заключается в следующем: если энергоблоком достигается определенная малая нагрузка, обеспечивающая определенный пропуск воды в систему регенеративных подогревателей, то открывается линия рециркуляции. В этом случае основной клапан и клапан рециркуляции выполняются в едином корпусе.

Второй вариант осуществляется при помощи трехходового клапана, для которого подобраны такие характеристики, чтобы расход через насос 2 и холодильники эжекторов 3 при любом положении был постоянен, а менялось соотношение расходов в линии рециркуляции 4 и основной магистрали. Следовательно, в магистрали значение расхода будет равно сумме двух расходов: конденсата и химочищенной воды.

Для определения закона регулирования конденсатора необходимо понять, что конденсатосборник, взятый в качестве объекта регулирования уровня, есть герметичный бак, имеющий насос на сливе, т. е. у него нет такого свойства, как самовыравнивание. Передаточную функцию для такого объекта можно записать в следующем виде:

$$W(P) = \frac{K}{P}. \quad (2.4)$$

В данном случае применять ПИ-закон регулирования нецелесообразно, т. к. время регулирования будет слишком большим. Следова-

тельно, лучше применять П-закон, который можно реализовать охватом ПИ-регулятора P_L жесткой обратной связью по положению регулирующего органа 5.

Регулятор уровня конденсатосборника сравнивает два сигнала: измеренный дифманометром ИП_L (показывает уровень конденсата) и сигнал задания $L_{зад}$.

2.7. Автоматическое регулирование регенеративных подогревателей

В регенеративных подогревателях высокого и низкого давления происходит подогрев питательной воды и конденсата паром, который берется в отборах турбины. Конденсат (или дренаж) от греющего пара может отводиться в паровое пространство предыдущего по ходу воды подогревателя или подаваться насосом в линию основного конденсата [8] (рис. 2.5). Насколько будет подогреваться вода в любом из подогревателей, вычисляется из статических расчетов и зависит от параметров пара нерегулируемых отборов турбины. Расход и параметры пара в отборах изменяются пропорционально изменению нагрузки турбины, следовательно, изменяется и подогрев воды в подогревателях. Из-за этого температуру воды после подогревателей не регулируют.

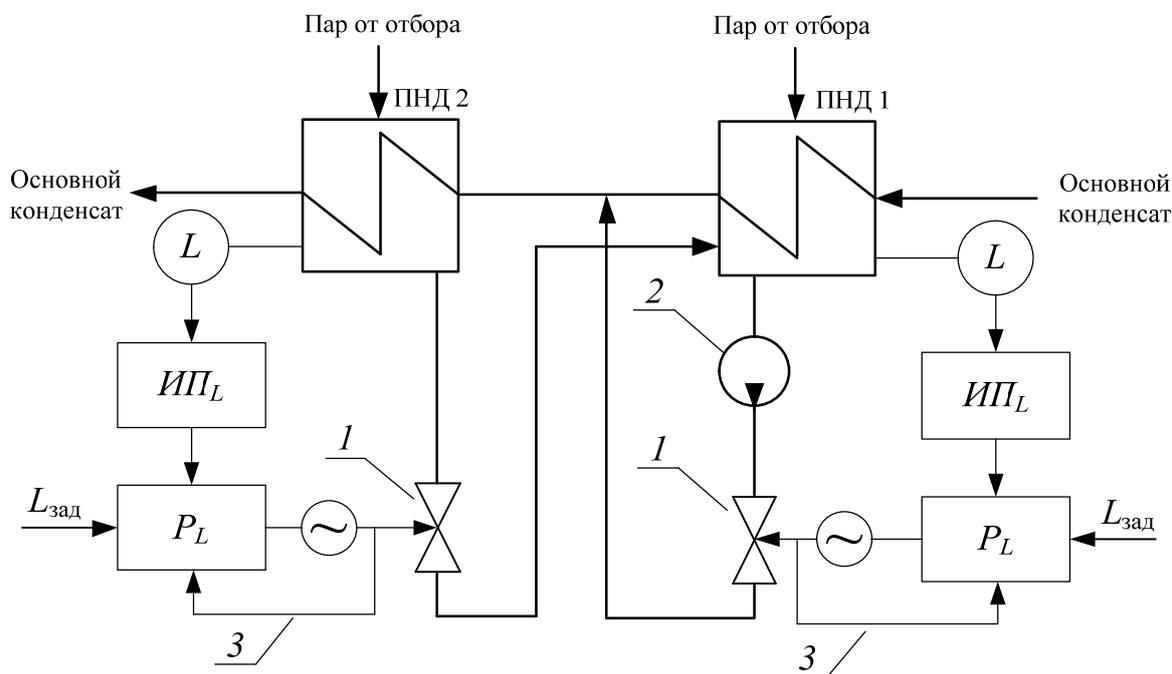


Рис. 2.5. Принципиальная схема АСР уровня в подогревателях низкого давления:

1 – регулирующий клапан; 2 – дренажный насос; 3 – обратная связь по положению регулирующего органа; L – первичный преобразователь уровня; ИП_L – измерительный преобразователь уровня; P_L – регулятор уровня; L_{зад} – задание значения уровня

Уровень конденсата пара в подогревателях есть единственная регулируемая величина. Если уровень повышается, то поверхность теплообмена затапливается, а это, в свою очередь, приводит к ухудшению конденсации пара. Также нежелательно, чтобы в подогревателях находился большой запас конденсата, т. к. в случае аварийной разгрузки турбогенератора давление в отборах резко снижается, следовательно, конденсат вскипает и может попасть через паропроводы в турбину. Чтобы этого избежать, специально устанавливают обратные клапаны.

Низкий уровень конденсата также нежелателен, так как из-за этого пар может попасть либо в нижестоящий подогреватель, либо в дренажный насос. В первом случае снижается КПД цикла, а во втором – может вызвать кавитацию насоса.

Как и в случае конденсатора, подогреватели с дренажными насосами на сливе и со сливом воды самотеком описываются уравнением интегрального звена. Следовательно, при регулировании уровня воды в подогревателях пользуются П-законом (ПИ-регулятор с обратной связью по положению клапана).

Если регулируется уровень в ПНД-2 [8], может измениться слив конденсата в этом подогревателе, и это будет возмущающим воздействием для ПНД1. В этом случае устанавливают устройства динамической связи между регуляторами, чтобы улучшить процессы регулирования в ПНД1.

Из условия инвариантности можно определить динамические свойства устройства связи.

2.8. Автоматическое регулирование давления в деаэраторе

Деаэратор, по сути, – смешивающий подогреватель питательной воды с одновременной ее термической деаэрацией. При повышении температуры воды и неизменности давления растворимость кислорода и углекислого газа уменьшается и в точке кипения становится равной нулю – это и есть принцип деаэрации. Процесс деаэрации осуществляется в головке деаэратора, в которую в верхнюю часть поступает конденсат из подогревателей низкого давления, а в нижнюю часть – греющий пар от отбора турбины. Конденсат движется сверху вниз с одной дырчатой тарелки на другую, нагреваясь движущимся кверху греющим паром до температуры кипения. При этом выделяются газы, которые удаляются

вместе с излишками пара в верхней части головки, так называемый выпар.

Деаэраторы бывают атмосферными и высокого давления. У атмосферных рабочее давление $P = 0,01 \div 0,02$ МПа, а у деаэраторов высокого давления – $P = 0,6 \div 0,7$ МПа. Деаэраторы, работающие с давлением 0,7 МПа, используют для мощных энергоблоков. Запас воды после деаэратора используется в случае аварии для питания парогенератора и хранится в баке большого объема (100 м^3 и более).

Естественно, что потери пара и воды имеют место в паросиловом цикле. Чтобы покрыть этот недостаток, в контур добавляют химически очищенную воду или чистый конденсат из испарителей.

Уровень воды в баке деаэратора может служить косвенным показателем баланса между расходом питательной воды и расходом конденсата, возвращающегося из турбины. Следовательно, для автоматического регулирования деаэратора можно сформулировать две задачи, первой является стабилизация состояния насыщения в головке, а вторая – уровень воды в баке. Регулировать режим деаэрации можно по температуре и давлению. Чаще всего регулирование осуществляют по давлению, так как датчики температуры являются инерционными и трудно найти представительную точку в головке деаэратора для измерения температуры.

В целом в деаэраторе регулируют давление и уровень. На давление в деаэраторе влияние оказывают давление и расход греющего пара, температура и расход конденсата. В свою очередь, уровень воды в баке незначительно влияет на давление, и им можно пренебречь. Для уровня в деаэраторе расход пара, питательной воды и конденсата являются возмущающими воздействиями.

Чтобы стабилизировать давление, необходимо регулировать расход греющего пара, а для уровня регулирующим воздействием будет расход добавочной химически очищенной воды.

Автоматическая система регулирования давления в деаэраторе представлена на рисунке 2.6, где сигнал измерительного преобразователя давления поступает на регулятор давления и сравнивается с заданным значением. Если есть несоответствия, то вырабатывается регулирующее воздействие на паровой клапан и изменяется расход пара. В случае АСР давления в деаэраторе используют астатический ПИ-регулятор с допустимым отклонением давления в статике ± 500 Па.

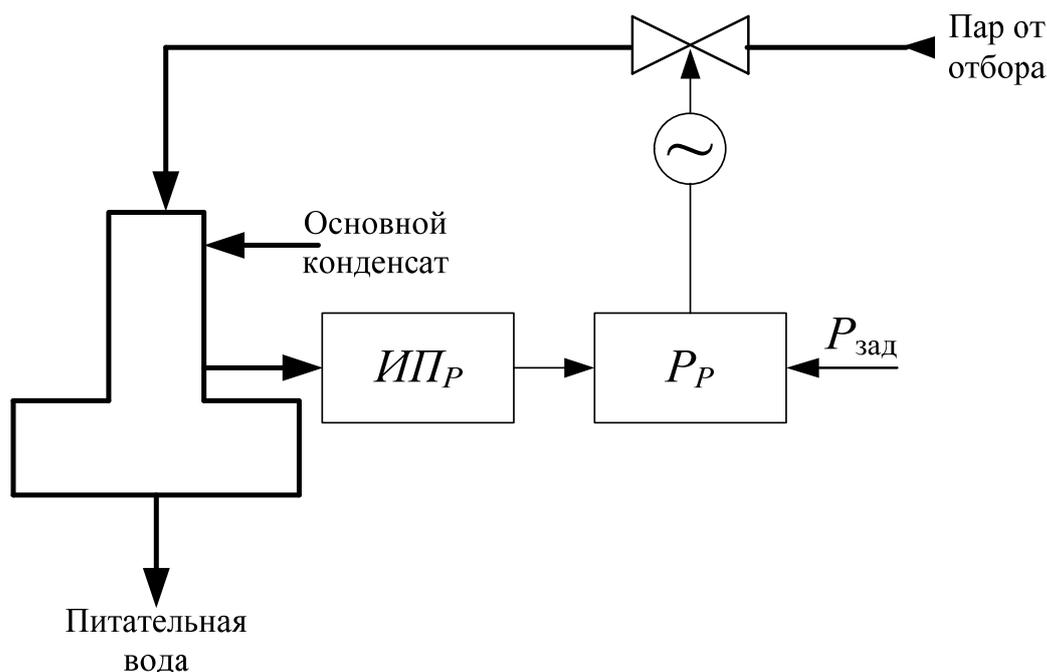


Рис. 2.6. Принципиальная схема АСР давления в деаэраторе:
 ИП_Р – измерительный преобразователь давления; Р_Р – регулятор давления;
 Р_{зад} – задание значения давления

2.9. Автоматическое регулирование уровня воды в деаэраторе

Необходимо рассмотреть случай, когда регулируемой величиной в деаэраторе является уровень. Деаэратор, по сути, – астатический объект, имеющий передаточную функцию

$$W(P) = \frac{K}{P}. \quad (2.5)$$

Но в случае мощных энергоблоков АЭС и ТЭС в конденсатор, а не в деаэратор подают добавочную воду в контур энергоблока (рис. 2.7). Конденсатор тоже – астатический объект, для которого стабилизация уровня происходит с помощью П-регулятора за счет изменения слива конденсата из конденсатора. Сливаемый конденсат, проходя систему регенеративных подогревателей, поступает в деаэратор. Соответственно, деаэратор как объект регулирования состоит из трех последовательных элементов (замкнутая АСР уровня в конденсаторе, конденсатопровод с подогревателями низкого давления и деаэратор).

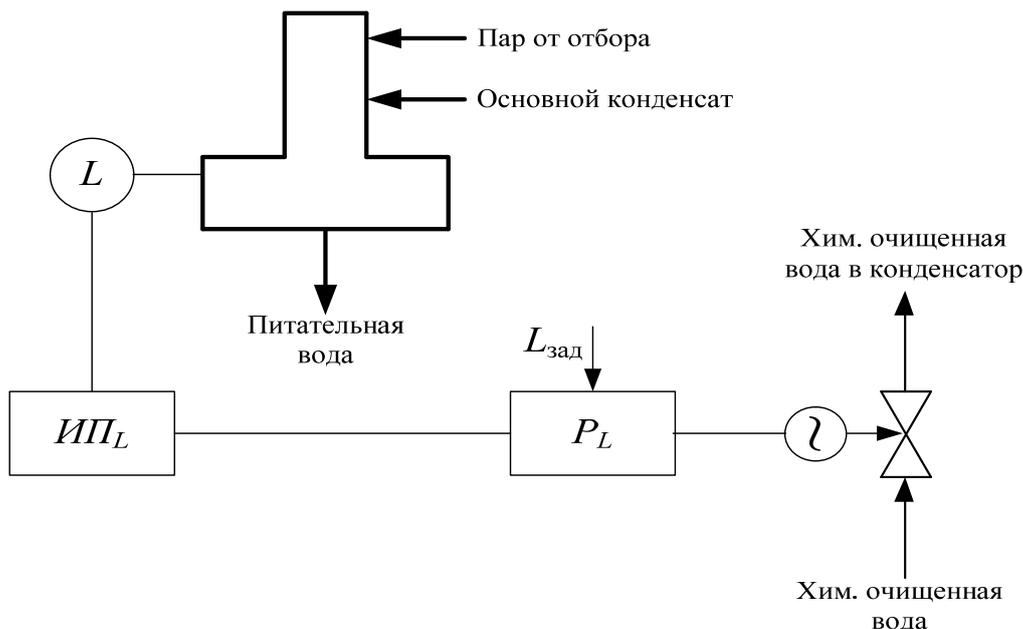


Рис. 2.7. Принципиальная схема АСР уровня в деаэраторе:
L – первичный преобразователь уровня; ИП_L – измерительный преобразователь уровня; P_L – регулятор уровня; L_{зад} – задание значения уровня

Автоматическая система регулирования уровня деаэратора включает П-регулятор и объект регулирования и описывается передаточной функцией

$$W(P) = \frac{K_1}{TP + 1} \cdot \frac{K_2}{P}. \quad (2.6)$$

В формуле (2.6) K_2 – коэффициент, характеризующий астатическое свойство деаэратора.

К поддержанию уровня в баке деаэратора постоянным не предъявляют жестких требований, так как деаэратор – неустойчивый объект. В связи с этим для регулирования уровня в баке деаэратора используют П-закон регулирования, который реализован охватом ПИ-регулятора жесткой обратной связью по положению регулирующего органа.

2.10. Автоматическое регулирование редуционно-охладительных установок

Для того чтобы снизить давление и температуру пара, применяют редуционно-охладительные установки (РОУ). В данном случае пар – острый, отводится из основного паропровода. Давление уменьшают при помощи дроссельного регулирующего клапана, а температуру – впрыском охлаждающей воды. Величину давления и температуры для редуцированного пара определяют исходя из назначения и требований потребителя пара.

На атомных электростанциях редуционно-охладительные установки применяют, чтобы подавать пар на уплотнения турбины, к эжекторам и парозежекторным машинам [8].

От потребителя зависит, насколько точно нужно поддерживать температуру и давление редуцированного пара. Чаще всего допускаемые отклонения температуры составляют $\pm 1,5\%$, давления пара – $\pm 2\%$.

На рис. 2.8 представлена схема подключения редуционно-охладительной установки, где свежий пар, проходя сквозь входную задвижку 1, поступает к дроссельному клапану 2, где снижается давление.

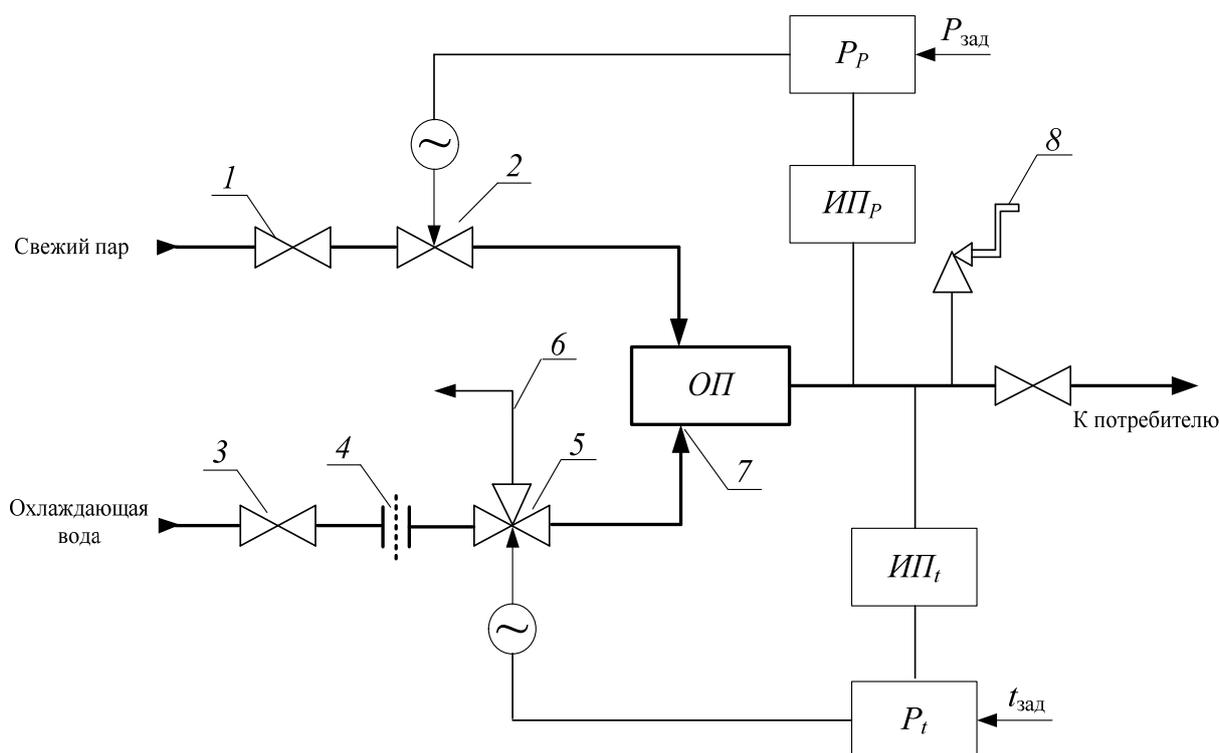


Рис. 2.8. Принципиальная схема АСР РОУ:

- 1 – входная задвижка; 2 – дроссельный клапан; 3 – водяная задвижка;
 4 – дроссельные шайбы; 5 – регулирующий клапан; 6 – сливная линия; 7 – форсунка;
 8 – предохранительное устройство; ОП – охладитель пара; ИПр – измерительный преобразователь давления; ИПт – измерительный преобразователь температуры;
 Рр – регулятор давления; Рт – регулятор температуры;
 $P_{зад}$ – задание значения давления; $t_{зад}$ – задание значения температуры

Через водяную задвижку 3 на регулирующий клапан 5 поступает охлаждающая вода к форсунке 7. Иногда устанавливают дроссельную шайбу или группы шайб 4 до дроссельного клапана 2. Это необходимо тогда, когда охлаждающая вода подается от источника с высоким давлением, намного превосходящим то, какое необходимо для впрыска воды.

Для дроссельных устройств рассчитывают такое количество воды, которое нужно, чтобы охладить максимально возможный расход пара. Чтобы избежать опасного повышения давления пара после РОУ, устанавливают предохранительное устройство δ на выходном паропроводе. Также на ОП (охладителе пара) устанавливают защитную трубу, предназначенную для уменьшения вредного воздействия воды на стенку охладителя пара.

Следовательно, редуционно-охладительная установка имеет две регулируемые величины – температуру и давление пара за ней.

Изменение давления свежего пара и его потребления является главным возмущением на давление пара в РОУ. На температуру пара оказывают влияние изменение потребления, расход и давление свежего пара.

Соответственно, для регулирования давления изменяют расход свежего пара, а температуры – расход охлаждающей воды. Редуционно-охладительная установка обладает таким свойством, как самовыравнивание (как объект регулирования давления), поэтому ее можно описать уравнением апериодического звена первого порядка. Если считать, что РОУ – объект регулирования температуры, то инерционность зависит только от инерционности датчика.

Регулятор давления P_p получает сигнал от измерительного преобразователя давления $ИП_p$ и воздействует на клапан 2.

Для регулирования температуры пара используют регулятор температуры P_t , получающий импульс от измерительного преобразователя температуры $ИП_t$ и воздействующий на клапан 5. Чтобы повысить точность измерения температуры, $ИП_t$ необходимо устанавливать на расстоянии 8–10 м после впрыска, чтобы влага полностью испарилась. Бывает, что клапан изменяет подачу воды в парохладитель путем сброса ее в сливную линию, при этом расход воды через дроссель 2 остается постоянным.

Такой способ регулирования давления после РОУ носит название – регулирование «после себя».

2.11. Общие принципы организации АСУ энергоблока

В энергоблоке АЭС производится преобразование вырабатываемой в ядерном реакторе тепловой энергии в механическую энергию вращения вала турбины, преобразуемую в электрическую энергию в электрогенераторе. Основной задачей управления паросиловой установкой яв-

ляется поддержание соответствия потребляемой энергии производимой. Для двухконтурных АЭС несоответствие вырабатываемой в реакторе энергии потребляемой турбиной выражается в изменении температуры и давления теплоносителя в первом контуре и давления и температуры насыщенного пара во втором контуре. Такое несоответствие устраняется регулятором мощности реактора, воздействующим на турбину или реактор в зависимости от режима работы энергоблока. Мощность энергоблока определяется заданным значением и может быть постоянной в базовом режиме работы энергоблока или переменной в регулирующем режиме.

Т. к. с точки зрения управления электрогенератор является практически безынерционным, электрическая мощность, поступающая в энергосистему равна механической энергии вращения ротора турбины. Энергосистемы, получающие электрическую энергию от энергоблоков АЭС, имеют большое количество потребителей, что вызывает постоянно изменяющуюся величину потребления энергии. Несоответствие количества выработанной энергии потребляемой оценивается по отклонению частоты в сети от номинального значения.

Допускаемое отклонение частоты в энергосистеме от номинального значения, равного 50 Гц, составляет $\pm 0,5$ Гц.

Основная задача регулирования турбоустановок заключается в поддержании соответствия между вырабатываемой и потребляемой энергией. Для решения этой задачи применяются регуляторы частоты и мощности турбины, а также регулятор мощности энергосистемы.

При построении АСУ энергоблоком электростанции необходимо учитывать то, что скорость вращения турбины определяет частота сети, т. е. все турбогенераторы, включенные в энергосистему, имеют одну и ту же частоту вращения. Регуляторы частоты вращения турбогенераторов реализуют пропорциональный закон регулирования. Турбины оснащаются механизмом управления турбины для изменения задания регулятору частоты вращения при изменении частоты сети.

Таким образом, АСУ энергоблоком обязательно включает в себя регуляторы частоты и мощности турбогенератора, давления пара, мощности реактора и другие регуляторы [8].

3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ

3.1. Дифференциальные уравнения элементов систем автоматического управления

Рассмотрим составление дифференциальных уравнений систем автоматического управления на примере пассивных электрических цепей относительно входных и выходных напряжений.

Для составления дифференциальных уравнений электрических цепей удобно пользоваться операторной формой записи сопротивлений: индуктивного LP , емкостного $1/CP$ и активного R , где $P = \frac{d}{dt}$ – символ (или оператор) дифференцирования.

Для электрической цепи (рис. 3.1) требуется составить дифференциальное уравнение относительно входного $U_{вх}(t)$ и выходного $U_{вых}(t)$ напряжений.

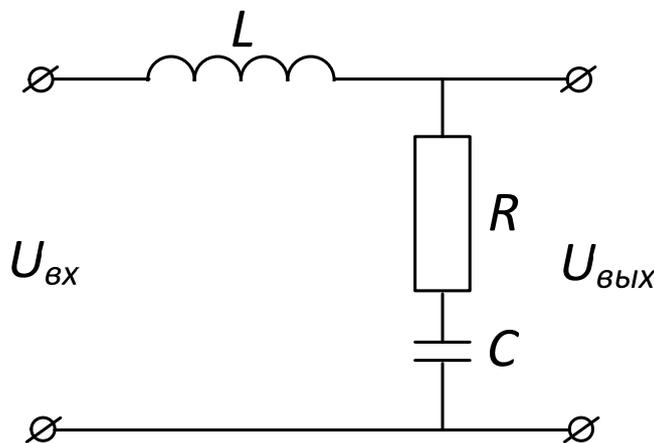


Рис. 3.1. Схема электрической цепи

Используя закон Ома, определяется значение тока, протекающего по цепи,

$$I(P) = \frac{U_{вх}(P)}{LP + R + \frac{1}{CP}}. \quad (3.1)$$

Тогда

$$U_{вых}(P) = I(P) \cdot \left(R + \frac{1}{CP} \right). \quad (3.2)$$

На основании двух уравнений получим

$$U_{\text{ВЫХ}}(P) = \frac{R + \frac{1}{CP}}{LP + R + \frac{1}{CP}} \cdot U_{\text{ВХ}}(P), \quad (3.3)$$

упростив выражение

$$U_{\text{ВЫХ}}(P) = \frac{R \cdot C \cdot P + 1}{L \cdot C \cdot P^2 + R \cdot C \cdot P + 1} \cdot U_{\text{ВХ}}(P). \quad (3.4)$$

Для получения дифференциального уравнения необходимо переписать уравнение

$$U_{\text{ВЫХ}}(P) \cdot (L \cdot C \cdot P^2 + R \cdot C \cdot P + 1) = (R \cdot C \cdot P + 1) \cdot U_{\text{ВХ}}(P). \quad (3.5)$$

Учитывая, что $P = \frac{d}{dt}$, а $P^2 = \frac{d^2}{dt^2}$, получается искомое дифференциальное уравнение электрической цепи:

$$L \cdot C \frac{d^2 U_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt^2} + R \cdot C \frac{dU_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt} + U_{\text{ВЫХ}}(t) = R \cdot C \frac{dU_{\text{ВХ}}(t)}{dt} + U_{\text{ВХ}}(t). \quad (3.6)$$

Задание на работу

Дано: схема электрической цепи и ее параметры.

Требуется составить дифференциальное уравнение электрической цепи относительно входного $U_{\text{ВХ}}(t)$ и выходного $U_{\text{ВЫХ}}(t)$ напряжений.

В отчете представить:

- 1) задание для практической работы и вариант задания;
- 2) порядок выполняемых действий с комментариями;
- 3) промежуточные и окончательные результаты.

№ вар.	Схема цепи	1	2	3	4
1		L_1	R_1	R_2	C_1
2		R_1	L_1	R_2	C_1
3		C_1	R_1	L_1	C_2
4		L_1	R_1	L_2	R_2
5		R_1	L_1	L_2	R_2
6		L_1	R_1	C_1	C_2
7		L_1	C_1	R_1	C_2
8		R_1	R_2	L_1	C_1
9		R_1	L_1	C_1	C_2
10		L_1	L_2	R_1	R_2

3.2. Временные характеристики систем

Дифференциальное уравнение объекта управления имеет вид

$$1000y''(t) + 100y'(t) + y(t) = x(t). \quad (3.7)$$

Требуется найти переходную характеристику.

На основе выражения (1.3) вынужденная составляющая решения $y_{\text{вын}}(t) = 1$. Составляем характеристическое уравнение $1000P^2 + 100P + 1 = 0$.

Находим корни уравнения:

$P_1 = -0,01127$, $P_2 = -0,08873$. Согласно формуле (1.5) свободная составляющая решения $y_{\text{св}}(t) = c_1 \cdot e^{-0,01127t} + c_2 \cdot e^{-0,08873t}$.

Общее решение, как сумма $y_{\text{св}}(t)$ и $y_{\text{вын}}(t)$, $y(t) = c_1 \cdot e^{-0,01127t} + c_2 \cdot e^{-0,08873t} + 1$.

Для определения постоянных интегрирования используем начальные условия. Найдем производную:

$$y'(t) = -0,01127c_1 e^{-0,01127t} - 0,08873c_2 e^{-0,08873t}. \quad (3.8)$$

Начальные условия дают систему уравнений

$$\begin{cases} y(0) = c_1 + c_2 + 1 = 0, \\ y'(0) = -0,01127c_1 - 0,08873c_2 = 0, \end{cases}$$

из которой находим

$$c_1 = -1,1455;$$

$$c_2 = 0,1455.$$

Подставляя постоянные интегрирования в общее решение, получаем искомое решение поставленной задачи:

$$y(t) = -1,1455 \cdot e^{-0,01127t} + 0,1455 \cdot e^{-0,08873t} + 1. \quad (3.9)$$

Задавая рядом значений времени ($t = 0, 10..200$), строим зависимость $y(t)$.

Задание на работу

Дано: дифференциальное уравнение элемента системы автоматического управления и его коэффициенты.

№ варианта	a_2	a_1	a_0	b_0
1	5000	150	1	1
2	1000	110	1	1
3	1200	120	1	2
4	4000	140	1	1
5	2600	130	1	1

6	4500	160	1	2
7	2464	100	1	1
8	5500	170	1	1
9	7000	180	1	2
10	4650	150	1	1
11	800	110	1	1
12	910	120	1	2
13	3450	140	1	1
14	2120	130	1	1
15	4100	160	1	2
16	2436	100	1	1
17	5125	170	1	1
18	7200	180	1	2
19	4202	150	1	1
20	805	110	1	1

Требуется решить дифференциальное уравнение элемента и найти переходную характеристику.

В отчете представить:

1. задание для практической работы и вариант задания;
2. порядок выполняемых действий с комментариями по решению дифференциального уравнения элемента;
3. расчет переходной характеристики элемента;
4. график переходной характеристики.

3.3. Определение качества процесса управления

Задание на работу

Требуется построить переходную характеристику и по ней определить прямые оценки качества.

№ варианта	a_2	a_1	a_0	b_0
1	5000	15	1	1
2	1000	11	1	1
3	1200	12	1	2
4	4000	14	1	1
5	2600	13	1	1
6	4500	16	1	2
7	2464	10	1	1
8	5500	17	1	1
9	7000	18	1	2

10	4650	15	1	1
11	800	11	1	1
12	910	12	1	2
13	3450	14	1	1
14	2120	13	1	1
15	4100	16	1	2
16	2436	10	1	1
17	5125	17	1	1
18	7200	18	1	2
19	4202	15	1	1
20	805	11	1	1

3.4. Передаточные функции звеньев и систем

Преобразуем дифференциальное уравнение

$$a_3 y'''(t) + a_2 y''(t) + a_1 y'(t) + a_0 y(t) = b_1 x'(t) + b_0 x(t)$$

по Лапласу

$$a_3 P^3 \cdot Y(P) + a_2 P^2 \cdot Y(P) + a_1 P \cdot Y(P) + a_0 \cdot Y(P) = b_1 P \cdot X(P) + b_0 \cdot X(P), \quad (3.10)$$

$$\text{или } (a_3 P^3 + a_2 P^2 + a_1 P + a_0) \cdot Y(P) = (b_1 P + b_0) \cdot X(P).$$

Найдем отношение $Y(P)$ к $X(P)$, т. е. передаточную функцию $W(P)$:

$$W(P) = \frac{b_1 P + b_0}{a_3 P^3 + a_2 P^2 + a_1 P + a_0}. \quad (3.11)$$

Начальное и конечное значения $y(t)$:

$$y(0) = \lim_{P \rightarrow \infty} \frac{b_1 P + b_0}{a_3 P^3 + a_2 P^2 + a_1 P + a_0}; \quad (3.12)$$

$$y(\infty) = \lim_{P \rightarrow 0} \frac{b_1 P + b_0}{a_3 P^3 + a_2 P^2 + a_1 P + a_0}. \quad (3.13)$$

Задание на работу

Дано: дифференциальное уравнение системы

$$a_3 y'''(t) + a_2 y''(t) + a_1 y'(t) + a_0 y(t) = b_1 x'(t) + b_0 x(t).$$

Требуется:

а) получить передаточную функцию системы по ее дифференциальному уравнению;

б) найти значения $y(0)$ и $y(\infty)$ при $x(t)=I(t)$ и нулевых начальных условиях с помощью теорем о начальном и конечном значениях оригинала.

Номер варианта	a_3	a_2	a_1	a_0	b_1	b_0
1	1000	5000	150	1	20	1
2	5000	1000	110	1	30	1
3	4000	1200	120	1	40	2
4	8000	4000	140	1	50	1
5	5200	2600	130	1	60	1
6	9000	4500	160	1	70	2
7	6000	2464	100	1	80	1
8	11000	5500	170	1	90	1
9	15000	7000	180	1	20	2
10	10000	4650	150	1	30	1
11	2000	800	110	1	40	1
12	3000	910	120	1	50	2
13	7000	3450	140	1	60	1
14	4000	2120	130	1	70	1
15	9500	4100	160	1	80	2
16	11000	2436	100	1	90	1
17	15000	5125	170	1	20	1
18	14000	7200	180	1	40	2
19	9500	4202	150	1	60	1
20	2500	805	110	1	80	1

В отчете представить:

- 1) задание для практической работы и вариант задания;
- 2) порядок выполняемых действий с комментариями;
- 3) результаты по выполнению пунктов а, б.

3.5. Структурный анализ автоматических систем

Требуется вывести эквивалентную передаточную функцию системы, структурная схема которой приведена на рис. 3.2, причем

$$W_1 = \frac{k_1}{T_1 P + 1}, W_2 = k_2, W_3 = k_3, W_4 = \frac{k_4}{P}, W_5 = \frac{k_5}{T_2 P + 1}, W_6 = k_6 \cdot e^{-P \cdot \tau}, W_7 = \frac{k_7}{P}.$$

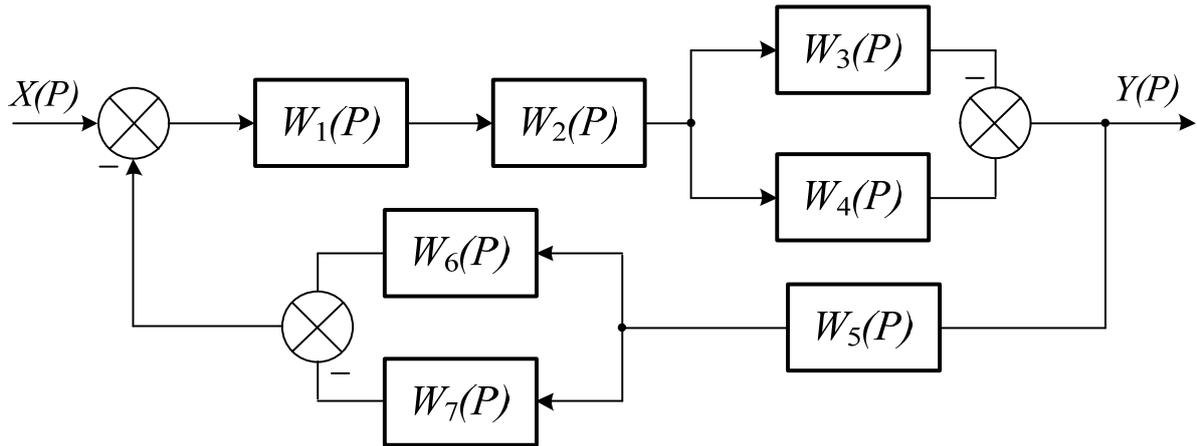
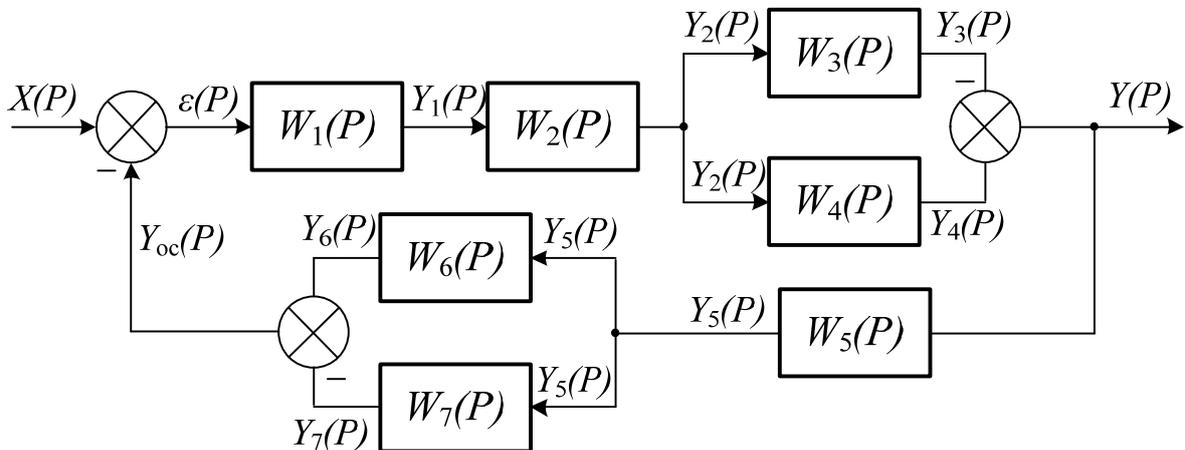


Рис. 3.2. Структурная схема системы

1. Обозначим на структурной схеме промежуточные сигналы:



2. Определим каждый промежуточный сигнал в системе:

$$\varepsilon(P) = X(P) - Y_{oc}(P); \quad (3.14)$$

$$Y_1(P) = W_1(P) \cdot \varepsilon(P) = W_1(P) \cdot \varepsilon(P);$$

$$Y_2(P) = Y_1(P) \cdot W_2(P) = W_1(P) \cdot W_2(P) \cdot \varepsilon(P);$$

$$Y_3(P) = Y_2(P) \cdot W_3(P) = W_1(P) \cdot W_2(P) \cdot W_3(P) \cdot \varepsilon(P);$$

$$Y_4(P) = Y_2(P) \cdot W_4(P) = W_1(P) \cdot W_2(P) \cdot W_4(P) \cdot \varepsilon(P).$$

При формировании сигнала $Y(P)$ сигнал $Y_3(P)$ вычитается из $Y_4(P)$:

$$Y(P) = Y_4(P) - Y_3(P) = W_1(P) \cdot W_2(P) \cdot (W_4(P) - W_3(P)) \cdot \varepsilon(P); \quad (3.15)$$

$$Y_5(P) = Y(P) \cdot W_5(P);$$

$$Y_6(P) = Y_5(P) \cdot W_6(P) = Y(P) \cdot W_5(P) \cdot W_6(P);$$

$$Y_7(P) = Y_5(P) \cdot W_7(P) = Y(P) \cdot W_5(P) \cdot W_7(P).$$

При формировании сигнала $Y_{oc}(P)$ сигнал $Y_7(P)$ вычитается из $Y_6(P)$:

$$Y_{oc}(P) = Y \cdot W_5(P) \cdot (W_6(P) - W_7(P)). \quad (3.16)$$

Подставив выражение 3.16 в 3.14, получим

$$\varepsilon(P) = X(P) - Y \cdot W_5(P) \cdot (W_6(P) - W_7(P)) \quad (3.17)$$

Полученное выражение 3.17 подставим в 3.15:

$$Y(P) = W_1(P) \cdot W_2(P) \cdot (W_4(P) - W_3(P)) \cdot (X(P) - Y \cdot W_5(P) \cdot (W_6(P) - W_7(P))),$$

Преобразуем полученное выражение:

$$\begin{aligned} Y(P) &= W_1(P) \cdot W_2(P) \cdot (W_4(P) - W_3(P)) \cdot (X(P) - Y \cdot W_5(P) \cdot (W_6(P) - W_7(P))) = \\ &= (W_1(P) \cdot W_2(P) \cdot (W_4(P) - W_3(P))) \cdot X(P) - \\ &\quad - (W_1(P) \cdot W_2(P) \cdot (W_4(P) - W_3(P)) \cdot W_5(P) \cdot (W_6(P) - W_7(P))) \cdot Y(P), \end{aligned}$$

или

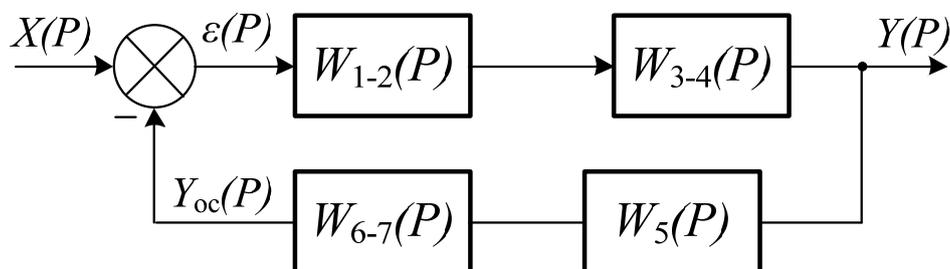
$$\begin{aligned} Y(P) \cdot (1 + W_1(P) \cdot W_2(P) \cdot (W_4(P) - W_3(P)) \cdot W_5(P) \cdot (W_6(P) - W_7(P))) &= \\ &= (W_1(P) \cdot W_2(P) \cdot (W_4(P) - W_3(P))) \cdot X(P) \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\frac{Y(P)}{X(P)} = \frac{(W_1(P) \cdot W_2(P) \cdot (W_4(P) - W_3(P)))}{1 + W_1(P) \cdot W_2(P) \cdot (W_4(P) - W_3(P)) \cdot W_5(P) \cdot (W_6(P) - W_7(P))}.$$

Другим способом можно определить эквивалентную передаточную функцию, используя приведенные формулы.

Для этого преобразуем структурную схему следующим образом:



В полученной структурной схеме $W_{1-2}(P) = W_1(P) \cdot W_2(P)$, т. к. звенья $W_1(P)$ и $W_2(P)$ соединены последовательно, $W_{3-4}(P) = W_4(P) - W_3(P)$, т. к. звенья соединены параллельно, $W_{6-7}(P) = W_6(P) - W_7(P)$, т. к. звенья соединены параллельно.

Передаточную функцию системы с отрицательной обратной связью определяем с помощью выражения 1.12:

$$W(P) = \frac{Y(P)}{X(P)} = \frac{W_{1-2}(P) \cdot W_{3-4}(P)}{1 + W_5(P) \cdot W_{6-7}(P) \cdot W_{1-2}(P) \cdot W_{3-4}(P)}.$$

Подставляя значения для $W_{1-2}(P)$, $W_{3-4}(P)$, $W_{6-7}(P)$, получим

$$\frac{Y(P)}{X(P)} = \frac{W_1(P) \cdot W_2(P) \cdot (W_4(P) - W_3(P))}{1 + W_5(P) \cdot (W_6(P) - W_7(P)) \cdot W_1(P) \cdot W_2(P) \cdot (W_4(P) - W_3(P))}$$

Подставив известные выражения для звеньев, получим

$$W_{X-Y}(P) = \frac{\frac{k_1}{T_1 \cdot P + 1} \cdot k_2 \cdot \left(\frac{k_4}{P} - k_3\right)}{1 + \frac{k_5}{T_2 \cdot P + 1} \left(k_6 \cdot e^{-P \cdot \tau} - \frac{k_7}{P}\right) \cdot \frac{k_1 \cdot k_2 \left(\frac{k_4}{P} - k_3\right)}{T_1 \cdot P + 1}}$$

Задание на работу

Дано: структурная схема системы.

Требуется: вывести эквивалентную передаточную функцию по каналу $X-Y$.

В отчете представить:

- 1) задание для практической работы и вариант задания;
- 2) порядок выполняемых действий с комментариями;
- 3) результаты по выполнению задания.

№ вар.	Структурная схема	$W_1(P)$	$W_2(P)$	$W_3(P)$	$W_4(P)$	$W_5(P)$	$W_6(P)$
1		$\frac{k_1}{T_1P+1}$	k_2	$\frac{k_3}{P}$	$\frac{k_4}{T_2P+1}$	k_5	$k_6 \cdot e^{-P\tau}$
2		$\frac{k_1}{P}$	k_2	$\frac{k_3}{T_1P+1}$	k_4	$\frac{k_5}{P}$	$k_6 \cdot e^{-P\tau}$
3		$k_1 \cdot e^{-P\tau}$	$\frac{k_2}{P}$	k_3	$\frac{k_4}{T_1P+1}$	k_5	$\frac{k_6}{T_2P+1}$
4		$k_1 \cdot e^{-P\tau}$	$\frac{k_2}{T_1P+1}$	k_3	$\frac{k_4}{P}$	$\frac{k_5}{T_2P+1}$	k_6
5		$\frac{k_1}{T_1P+1}$	k_2	$\frac{k_3}{P}$	k_4	$\frac{k_5}{T_2P+1}$	$\frac{k_6}{P}$
6		$k_1 \cdot e^{-P\tau}$	$\frac{k_2}{P}$	k_3	$\frac{k_4}{T_1P+1}$	k_5	$k_6 \cdot e^{-P\tau}$
7		$k_1 \cdot e^{-P\tau}$	$\frac{k_2}{T_1P+1}$	k_3	$\frac{k_4}{T_2P+1}$	k_5	$k_6 \cdot e^{-P\tau}$
8		$k_1 \cdot e^{-P\tau}$	$\frac{k_2}{P}$	$\frac{k_3}{T_1P+1}$	k_4	$\frac{k_5}{P}$	$k_6 \cdot e^{-P\tau}$
9		$\frac{k_1}{P}$	$\frac{k_2}{T_1P+1}$	k_3	$\frac{k_4}{P}$	$k_5 \cdot e^{-P\tau}$	$\frac{k_6}{T_2P+1}$
10		$\frac{k_1}{T_1P+1}$	k_2	$\frac{k_3}{P}$	$\frac{k_4}{T_2P+1}$	k_5	$k_6 \cdot e^{-P\tau}$

№ вар.	Структурная схема	$W_1(P)$	$W_2(P)$	$W_3(P)$	$W_4(P)$	$W_5(P)$	$W_6(P)$
11		$\frac{k_1}{T_1P+1}$	k_2	$\frac{k_3}{T_2P+1}$	$\frac{k_4}{P}$	$\frac{k_5}{P}$	$k_6 \cdot e^{-P\tau}$
12		$k_1 \cdot e^{-P\tau}$	$\frac{k_2}{P}$	k_3	$\frac{k_4}{T_1P+1}$	$\frac{k_5}{P}$	k_6
13		$k_1 \cdot e^{-P\tau}$	$\frac{k_2}{T_1P+1}$	k_3	$\frac{k_4}{T_1P+1}$	$\frac{k_5}{P}$	$k_6 \cdot e^{-P\tau}$
14		$\frac{k_1}{T_1P+1}$	k_2	$\frac{k_3}{P}$	$k_4 \cdot e^{-P\tau}$	$\frac{k_5}{P}$	$\frac{k_6}{T_2P+1}$
15		$k_1 \cdot e^{-P\tau}$	$\frac{k_2}{T_1P+1}$	k_3	$\frac{k_4}{P}$	$\frac{k_5}{T_2P+1}$	k_6
16		k_1	$\frac{k_2}{T_1P+1}$	k_3	$k_4 \cdot e^{-P\tau}$	$\frac{k_5}{P}$	$k_6 \cdot e^{-P\tau}$
17		$k_1 \cdot e^{-P\tau}$	$\frac{k_2}{P}$	$\frac{k_3}{T_1P+1}$	k_4	$\frac{k_5}{P}$	$k_6 \cdot e^{-P\tau}$
18		$\frac{k_1}{T_1P+1}$	k_2	k_3	$\frac{k_4}{P}$	$\frac{k_5}{T_2P+1}$	$k_6 \cdot e^{-P\tau}$
19		$\frac{k_1}{P}$	k_2	$k_3 \cdot e^{-P\tau}$	$\frac{k_4}{P}$	k_5	$\frac{k_6}{T_2P+1}$
20		$k_1 \cdot e^{-P\tau}$	$\frac{k_2}{T_1P+1}$	$\frac{k_3}{P}$	$\frac{k_4}{T_1P+1}$	k_5	$\frac{k_6}{P}$

3.6. Частотные характеристики звеньев и систем

Передаточная функция системы имеет вид

$$W(P) = \frac{1}{10P+1}.$$

Заменяем в $W(P)$ оператор P на $i\omega$ и проводим необходимые преобразования:

$$W(i\omega) = \frac{1}{10i\omega+1}.$$

Умножаем числитель и знаменатель $W(i\omega)$ на комплексное сопряженное число знаменателю:

$$W(i\omega) = \frac{1 \cdot (1-10i\omega)}{(10i\omega+1) \cdot (1-10i\omega)} = \frac{1-10i\omega}{10^2 \cdot \omega^2 + 1}.$$

Выделяем вещественную и мнимую составляющие:

$$\operatorname{Re}(\omega) = \frac{1}{100 \cdot \omega^2 + 1}; \quad \operatorname{Im}(\omega) = -\frac{10 \cdot \omega}{100 \cdot \omega^2 + 1}.$$

Находим АЧХ и ФЧХ:

$$\begin{aligned} A(\omega) &= \sqrt{\operatorname{Re}^2(\omega) + \operatorname{Im}^2(\omega)} = \sqrt{\left(\frac{1}{100 \cdot \omega^2 + 1}\right)^2 + \left(-\frac{10 \cdot \omega}{100 \cdot \omega^2 + 1}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\frac{1+100 \cdot \omega^2}{(1+100 \cdot \omega^2)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+100 \cdot \omega^2}}, \end{aligned}$$

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}(\omega)}{\operatorname{Re}(\omega)} = \operatorname{arctg} \frac{-\frac{10 \cdot \omega}{100 \cdot \omega^2 + 1}}{\frac{1}{100 \cdot \omega^2 + 1}} = -\operatorname{arctg}(10 \cdot \omega).$$

Задаваясь рядом значений частоты ($\omega = 0; 0,001 \dots 0,1$), находятся значения ВЧХ и МЧХ. Строится АФЧХ в координатах (Im , Re).

Задание на работу

Дано: дифференциальное уравнение системы (согласно заданному варианту из разд. 3.2).

Требуется:

- найти передаточную функцию;
- определить частотные характеристики системы АЧХ, ФЧХ, ВЧХ, МЧХ;

в) на миллиметровой бумаге построить график АФЧХ для 15 значений частот.

В отчете представить:

- 1) задание для практической работы и вариант задания.
- 2) порядок выполняемых действий с комментариями.
- 3) результаты по выполнению пунктов а, б, в.

3.7. Исследование устойчивости систем автоматического управления с помощью критериев Рауса и Гурвица

Алгебраические критерии Рауса и Гурвица представляют собой алгебраические неравенства, связывающие между собой коэффициенты характеристического уравнения системы:

$$a_n P^n + a_{n-1} P^{n-1} + \dots + a_1 P + a_0 = 0$$

В дальнейшем будем полагать, что коэффициент $a_n > 0$. Если это не так, то умножением на -1 характеристическое уравнение приводится к нужной форме.

Пример 1

Определить, устойчива ли система с характеристическим уравнением

$$0,8P^7 + 5,5P^6 + 15P^5 + 25P^4 + 28P^3 + 17P^2 + 6P + 1 = 0.$$

Составляем таблицу Рауса:

r	Номер строки	Номер столбца			
		1	2	3	4
	–	0,8	15	28	6
	–	5,5	25	17	1
$r_1 = \frac{0,8}{5,5} = 0,145$	1	$c_{11} = 15 - 0,145 \cdot 25 = 11,4$	$c_{12} = 28 - 0,145 \cdot 17 = 25,5$	$c_{13} = 6 - 0,145 \cdot 1 = 5,85$	0
$r_2 = \frac{5,5}{11,4} = 0,482$	2	$c_{21} = 25 - 0,482 \cdot 25,5 = 12,7$	$c_{22} = 17 - 0,482 \cdot 5,85 = 14,2$	$c_{23} = 1$	0
$r_3 = \frac{11,4}{12,7} = 0,898$	3	$c_{31} = 25,5 - 0,898 \cdot 14,2 = 12,8$	$c_{32} = 5,85 - 0,898 \cdot 1 = 4,96$	$c_{33} = 0$	0
$r_4 = \frac{12,7}{12,8} = 0,992$	4	$c_{41} = 14,2 - 0,992 \cdot 4,96 = 9,28$	$c_{42} = 1$	0	0
$r_5 = \frac{12,8}{9,28} = 1,38$	5	$c_{51} = 4,97 - 1,38 \cdot 1 = 3,59$	$c_{52} = 0$	0	0
$r_6 = \frac{9,28}{3,59} = 2,58$	6	$c_{61} = 1$	0	0	0

Все элементы первого столбца положительны и все корни характеристического уравнения поэтому левые. Система устойчива.

Пример 2

Проверить на устойчивость систему с характеристическим уравнением

$$25P^4 + 28P^3 + 17P^2 + 6P + 1 = 0.$$

Составляем определитель Гурвица

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} 28 & 6 & 0 & 0 \\ 25 & 17 & 1 & 0 \\ 0 & 28 & 6 & 0 \\ 0 & 25 & 17 & 1 \end{vmatrix}$$

Вычисляем определители Гурвица:

$$\Delta_1 = 28; \Delta_2 = 28 \cdot 17 - 6 \cdot 25 = 326; \Delta_3 = 28 \cdot 17 \cdot 6 + 6 \cdot 1 \cdot 0 + 0 \cdot 25 \cdot 28 - 0 \cdot 17 \cdot 0 - 6 \cdot 25 \cdot 6 - 28 \cdot 1 \cdot 28 = 1172; \Delta_4 = \Delta_3 \cdot a_0 = 1172 \cdot 1 = 1172$$

Все определители Гурвица положительны. Система устойчива.

Задание на работу

Дано:

а) характеристическое уравнение системы № 1

$$a_7P^7 + a_6P^6 + a_5P^5 + a_4P^4 + a_3P^3 + a_2P^2 + a_1P + a_0 = 0;$$

б) характеристическое уравнение системы № 2

$$a_4P^4 + a_3P^3 + a_2P^2 + a_1P + a_0 = 0.$$

Требуется исследовать: систему № 1 на устойчивость с помощью критерия Рауса, систему № 2 с помощью критерия Гурвица.

Номер варианта	Значение коэффициентов системы № 1, системы № 2							
	a_7	a_6	a_5	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0
1	8	7	6	5	4	3	2	1
	–	–	–	3	4	5	2	1
2	5	8	1	4	11	9	6	1
	–	–	–	6	3	9	2	1
3	1	2	3	4	5	6	7	8
	–	–	–	10	5	3	10	2
4	7	15	7	4	6	3	8	2
	–	–	–	8	6	3	4	1
5	20	40	76	76	42	22	16	5
	–	–	–	76	42	41	44	2
6	42	56	80	88	46	28	24	8
	–	–	–	65	84	98	38	1

7	55 –	95 –	90 –	16 5	56 93	41 21	44 8	3 1
8	12 –	10 –	4 –	6 6	1 8	5 2	2 7	1 2
9	65 –	26 –	98 –	37 34	64 2	5 42	6 5	5 3
10	3 –	1 –	2 –	6 4	8 8	4 2	8 5	1 7
11	6 –	5 –	6 –	5 4	2 8	7 5	6 1	1 1
12	5 –	7 –	1 –	4 4	6 6	1 2	4 1	1 2
13	6 –	7 –	2 –	9 9	8 8	3 7	8 6	8 5
14	5 –	5 –	2 –	5 7	5 3	9 5	2 4	3 1
15	8 –	9 –	1 –	3 2	1 3	4 8	2 9	2 6
16	4 –	5 –	2 –	5 6	6 7	9 0,5	2 1	1 1
17	10 –	9 –	8 –	1 1	4 5	7 6	9 7	1 8
18	1 –	2 –	3 –	4 4	5 5	6 6	7 7	1 1
19	2 –	2 –	6 –	7 7	2 2	6 5	6 4	9 1
20	4 –	3 –	4 –	3 9	8 7	4 2	2 8	8 3

В отчете представить:

- 1) задание для практической работы и вариант задания;
- 2) порядок исследования систем на устойчивость;
- 3) промежуточные и окончательные результаты исследования.

3.8. Исследование устойчивости систем автоматического управления с помощью критерия Михайлова

Оценить с помощью критерия Михайлова устойчивость системы с характеристическим уравнением

$$P^3 + 0.5P^2 + P + 2 = 0 .$$

Записываем уравнение кривой Михайлова:

$$M(i\omega) = (i\omega)^3 + 0,5 \cdot (i\omega)^2 + i\omega + 2 = -i \cdot \omega^3 - 0,5 \cdot \omega^2 + i\omega + 2 = 2 - 0,5 \cdot \omega^2 + i \cdot (\omega - \omega^3)$$

Выделяем вещественную и мнимую части годографа:

$$\operatorname{Re}(w) = 2 - 0,5 \cdot \omega^2; \quad \operatorname{Im}(w) = \omega - \omega^3.$$

Задавая рядом значений ω , строится годограф Михайлова.

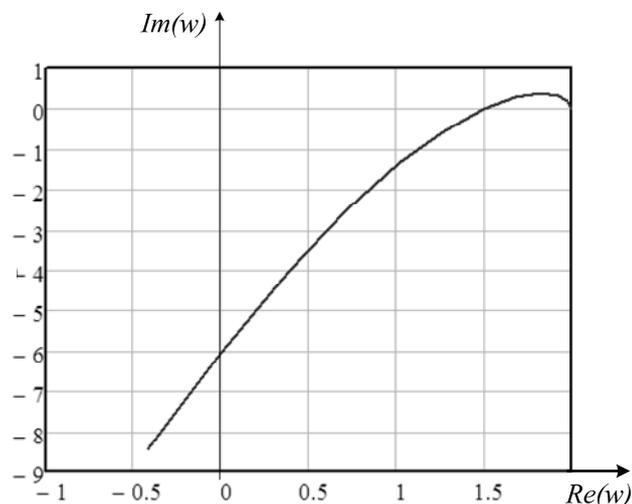


Рис. 3.3. Годограф Михайлова

Анализ рисунка показывает, что нарушена последовательность прохождения годографом квадрантов. Система неустойчива.

Задание на работу

Дано: характеристическое уравнение замкнутой системы.

Требуется исследовать систему на устойчивость систему с помощью критерия Михайлова.

Номер варианта	Характеристическое уравнение замкнутой системы
1	$0,17P^3 + 0,8P^2 + 1,9P + 1,1 = 0$
2	$P^3 + 20P^2 + 800P + 1250 = 0$
3	$0,05P^3 + 5P^2 + 3,2P + 1 = 0$
4	$124P^3 + 84P^2 + 14P + 1 = 0$
5	$0,05P^3 + 0,5P^2 + 2P + 12 = 0$
6	$0,06P^3 + 0,66P^2 + 1,6P + 1 = 0$
7	$P^3 + 2P^2 + 3P + 4 = 0$
8	$4P^3 + 3P^2 + 2P + 1 = 0$
9	$8P^3 + 4P^2 + 2P + 1 = 0$

10	$5P^3 + 50P^2 + 650P + 1250 = 0$
11	$0,2P^3 + 0,005P^2 + P + 25 = 0$
12	$1,05P^3 + 3,8P^2 + 4,3P + 1.5 = 0$
13	$20P^3 + 9P^2 + 3P + 1 = 0$
14	$10P^3 + 7P^2 + 3P + 1 = 0$
15	$100P^3 + 25P^2 + 5P + 1 = 0$
16	$3P^3 + 18P^2 + 9P + 1 = 0$
17	$25P^3 + 15P^2 + 10P + 5 = 0$
18	$25P^3 + 5P^2 + 1P + 5 = 0$
19	$9P^3 + 3P^2 + 2P + 1 = 0$
20	$40P^3 + 20P^2 + 10P + 2 = 0$

В отчете представить:

- 1) задание для практической работы и вариант задания;
- 2) порядок исследования системы на устойчивость;
- 3) Промежуточные и окончательные результаты исследования.

3.9. Параметрический синтез линейных систем регулирования корневым методом (РАФЧХ)

Требуется определить параметры настройки П, И и ПИ-регуляторов с учетом минимизации первого интегрального критерия качества работы системы регулирования для объекта с передаточной

функцией $W_{об}(P) = \frac{K \cdot e^{-\tau \cdot P}}{T \cdot P + 1}$ с требованием к запасу устойчивости $\Psi = 0,75$.

Определяем РАФЧХ объекта:

$$\begin{aligned}
 W_{об}(m, i\omega) &= \frac{K \cdot e^{-\tau \cdot (-m \cdot \omega + i \cdot \omega)}}{T \cdot (-m \cdot \omega + i \cdot \omega) + 1} = \frac{K \cdot e^{m \cdot \omega \tau} \cdot e^{-i \cdot \omega \tau}}{(1 - T \cdot \omega \cdot m) + i \cdot T \cdot \omega} = \\
 &= \frac{K \cdot e^{m \cdot \omega \tau} \cdot (\cos(\omega \cdot \tau) - i \cdot \sin(\omega \cdot \tau)) \cdot [(1 - T \cdot m \cdot \omega) - i \cdot T \cdot \omega]}{(1 - T \cdot m \cdot \omega)^2 + T^2 \cdot \omega^2} = \\
 &= \frac{K \cdot e^{m \cdot \omega \tau} \cdot [(1 - T \cdot m \cdot \omega) \cdot \cos(\omega \cdot \tau) + T \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot \tau)]}{(1 - T \cdot m \cdot \omega)^2 + T^2 \cdot \omega^2} - \\
 &- i \cdot \frac{K \cdot e^{m \cdot \omega \tau} \cdot [(1 - T \cdot m \cdot \omega) \cdot \sin(\omega \cdot \tau) + T \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot \tau)]}{(1 - T \cdot m \cdot \omega)^2 + T^2 \cdot \omega^2}.
 \end{aligned}$$

Для удобства расчета частотных характеристик введем обозначения:

$$A_1 = 1 - T \cdot m \cdot \omega; \quad A_2 = T \cdot \omega; \quad A_0 = A_1^2 + A_2^2; \quad A_3 = A_1 \cdot K / A_0; \quad A_4 = -A_2 \cdot K / A_0; \\ A_5 = e^{m \cdot \omega \cdot \tau}.$$

Тогда выражения для составляющих РАФЧХ будут выглядеть компактней:

$$\operatorname{Re}_{\text{о6}}(m, \omega) = A_5 \cdot [A_3 \cdot \cos(\omega \cdot \tau) + A_4 \cdot \sin(\omega \cdot \tau)];$$

$$\operatorname{Im}_{\text{о6}}(m, \omega) = A_5 \cdot [A_4 \cdot \cos(\omega \cdot \tau) - A_3 \cdot \sin(\omega \cdot \tau)];$$

$$A_{\text{о6}}^2(m, \omega) = \operatorname{Re}_{\text{о6}}^2(m, \omega) + \operatorname{Im}_{\text{о6}}^2(m, \omega).$$

При известной величине $m = 0,221$ (см. таблицу соответствия оценок запаса устойчивости) задается начальное значение частоты $\omega = 0$ и шаг по частоте $\Delta\omega = 0,01 \text{ с}^{-1}$. Необходимые вычисления ведутся по расчетным формулам для ПИ-регулятора с учетом выражений для расширенных частотных характеристик объекта. Результаты расчетов сводятся в таблицу, по данным которой строится график зависимости K_p/T_i от K_p (рис. 3.4). Точки на графике определяют параметры настройки регуляторов:

1. пересечение с осью K_p – П-регулятор;
2. пересечение с осью K_p/T_i – И-регулятор;
3. максимум отношения K_p/T_i – ПИ-регулятор.

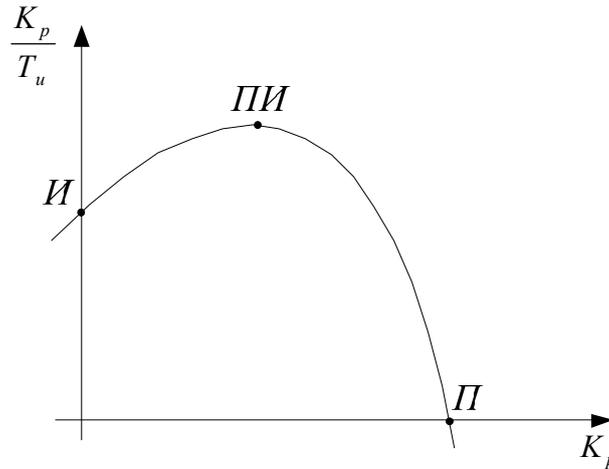


Рис. 3.4. Граница заданного запаса устойчивости

Задание на работу

Дано: Передаточная функция объекта регулирования и его параметры, требование к запасу устойчивости системы.

Требуется определить параметры настройки П, И и ПИ-регуляторов в одноконтурной системе регулирования.

$$W_{\text{о6}}(P) = \frac{K \cdot e^{-\tau \cdot P}}{T \cdot P + 1} \text{ — передаточная функция объекта.}$$

Номер варианта	K	T, c	τ, c	Ψ
1	1	20	2	0,75
2	2	40	5	0,8
3	3	60	7	0,85
4	4	80	9	0,9
5	5	100	11	0,95
6	1	30	13	0,998
7	2	60	15	0,75
8	3	90	17	0,8
9	4	120	19	0,85
10	5	50	5	0,9
11	1	100	10	0,95
12	2	150	15	0,998
13	3	40	20	0,75
14	4	80	25	0,8
15	5	120	30	0,85
16	1	160	10	0,9
17	2	20	8	0,95
18	3	40	6	0,998
19	4	60	12	0,75
20	5	80	16	0,8

В отчете представить:

- 1) задание для практической работы и вариант задания;
- 2) порядок и результаты расчетов;
- 3) график границы заданного запаса устойчивости на миллиметровой бумаге;
- 4) найденные параметры настройки регуляторов.

3.10. Разработка структурных схем систем автоматического регулирования

При разработке проекта системы автоматизации решается ряд задач и в первую очередь решается вопрос выбора структуры системы управления. Структура системы управления – это совокупность составляющих автоматизированной системы, на которые ее можно разделить по определенным признакам, а также каналы передачи воздействия между ними. Графическое изображение структуры называется структурной схемой.

Выбор структуры управления объектом автоматизации оказывает существенное влияние на эффективность ее работы, надежность системы управления и т.д.

На рис. 3.5 представлена структурная схема системы автоматизации в общем виде.

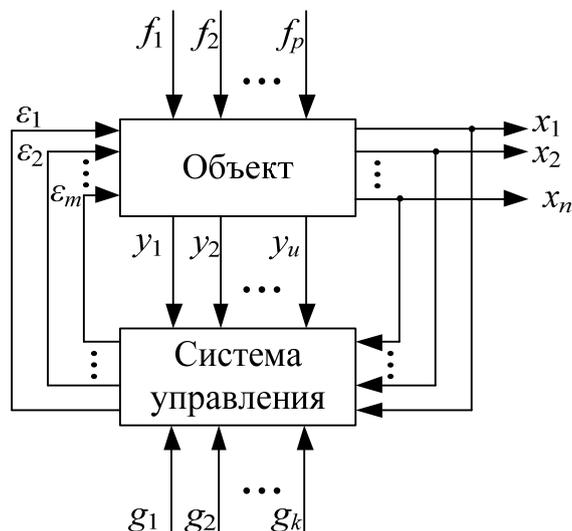


Рис. 3.5. Общий вид структурной схемы

Система автоматизации включает в себя объект управления и саму систему управления этим объектом. Требуемый результат функционирования системы, характеризующийся параметрами x_1, x_2, \dots, x_n , достигается в результате определенного взаимодействия между системой управления и объектом автоматизации. К параметрам x_1, x_2, \dots, x_n можно отнести параметры, характеризующие ход технологического процесса (температура, давление, расход рабочей среды и т. д.).

Кроме основных параметров (x_1, x_2, \dots, x_n) работа объекта автоматизации характеризуется рядом вспомогательных параметров, y_1, y_2, \dots, y_u . К таким параметрам относятся, например, величины, характеризующие работу установок подготовки пара, они также должны контролироваться и регулироваться.

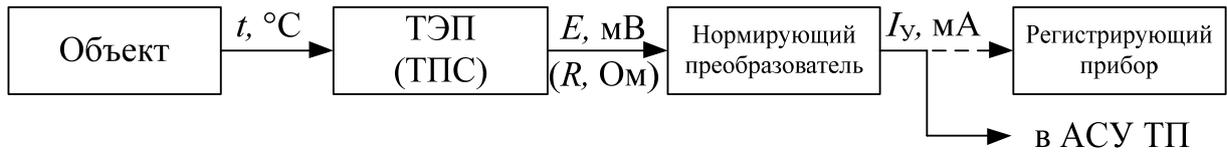
На объект в процессе его функционирования воздействуют возмущения f_1, f_2, \dots, f_p , которые вызывают отклонения параметров x_1, x_2, \dots, x_n от заданных значений. Информация о действительных значениях $x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, y_2, \dots, y_u$ поступает в систему управления, где происходит ее сравнение с заданными для них значениями g_1, g_2, \dots, g_k . В случае их отклонения от заданных, превышающего допустимое значение, система управления формирует воздействие $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_m$, компенсирующее отклонение выходных параметров в сторону уменьшения отклонения.

Таким образом, структурная схема содержит в общем виде основные решения по организационной, функциональной и технической структурам системы управления при соблюдении иерархии построения системы, а также данные о взаимосвязи между пунктами управления и контроля. При этом принципы организации оперативного управления технологическим объектом, состав и обозначения отдельных элементов структурной схемы, принятые при выполнении структурной схемы, сохраняются во всех документах проекта автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП).

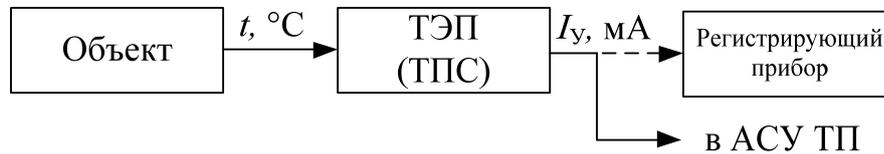
Элементы структурной схемы изображаются, как правило, прямоугольниками, внутри которых обозначается их производственная структура. При этом выделяются цехи, участки, технологические линии, которые являются существенными для раскрытия в документах проекта всех взаимосвязей [12].

Проектирование структурных схем автоматических систем управления необходимо начинать с определения компонентов системы, составляющих измерительную часть АСУ ТП и управляющую часть. Компоненты измерительной части определяются измеряемыми параметрами и методами измерения.

При измерении температуры используются термоэлектрические преобразователи (ТЭП) или термопреобразователи сопротивления (ТПС), которые могут иметь выходной сигнал в виде ТЭДС (для ТЭП) и сопротивления (для ТПС) или унифицированный выходной токовый сигнал (0...5 мА, 0...20 мА или 4...20 мА). Если постоянный контроль температуры не предусмотрен, а ее измерение требуется только для функционирования АСУ ТП, то преобразователь температуры, не имеющий унифицированного выходного сигнала, комплектуется только нормирующим преобразователем с соответствующей номинальной статической характеристикой и выходным унифицированным сигналом. Если в АСУ ТП предусмотрен постоянный контроль измеряемой температуры, то сигнал от нормирующего преобразователя поступает в АСУ ТП и на регистрирующий прибор. Описанные структурные схемы приведены на рис. 3.6.



а)



б)

Рис. 3.6. Структурные схемы измерительного канала температуры:

а – с использованием нормирующего преобразователя;

б – без использования нормирующего преобразователя

При измерении давления используются преобразователи давления, имеющие выходные сигналы в виде постоянного тока, напряжения постоянного тока и др. Наиболее распространёнными являются преобразователи давления с выходным унифицированным токовым сигналом. Если требуется постоянный контроль давления, сигнал от преобразователя поступает к регистрирующему прибору и подается в АСУ ТП. Примеры структурных схем при измерении давления приведены на рис. 3.7.



а)



б)

Рис. 3.7. Структурные схемы канала измерения давления:

а – с постоянным контролем давления; б – без постоянного контроля давления

Структурная схема измерительного канала расхода главным образом определяется методом измерения. В случае использования метода переменного перепада давления составляющими измерительной системы будут: сужающее устройство, вспомогательное устройство (конденсационный/уравнительный сосуд), преобразователь перепада давления, блок преобразования сигнала (для преобразователей перепада давления

с квадратичной характеристикой), регистрирующий прибор. Примеры структурных схем измерительного канала расхода приведены на рис. 3.8.

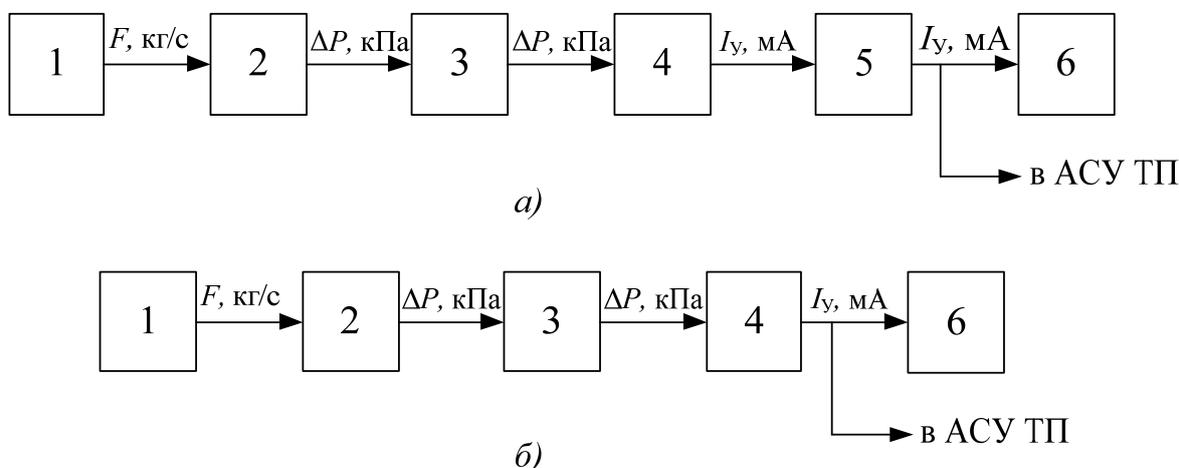


Рис. 3.8. Структурные схемы измерительного канала расхода методом переменного перепада давления:

- а* – с преобразователем перепада давления с квадратичной характеристикой;
- б* – с преобразователем перепада давления с линейной характеристикой;
- 1* – объект управления; *2* – сужающее устройство; *3* – вспомогательное устройство; *4* – преобразователь разности давлений; *5* – блок преобразования сигналов; *6* – регистрирующий прибор

Структурные схемы измерения концентрации и уровня также определяются методом измерения и типом средств измерений. Примеры структурных схем приведены на рис. 3.9.

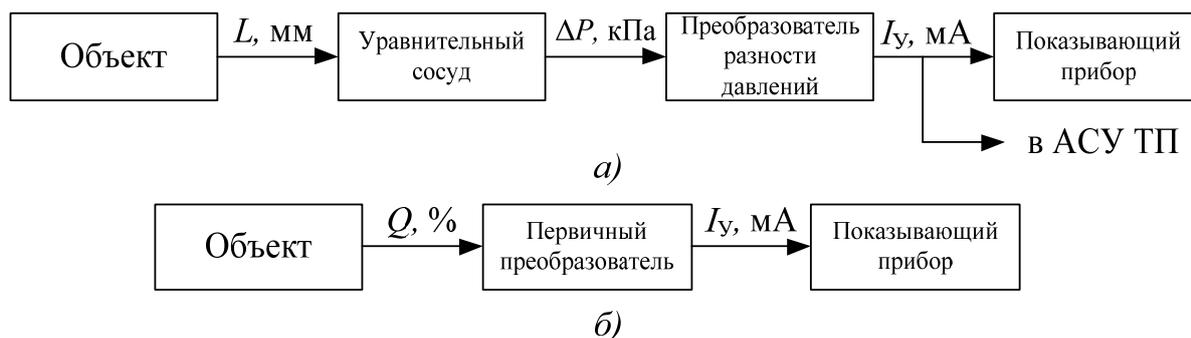


Рис. 3.9. Структурные схемы измерительных каналов:
а – уровня; *б* – концентрации

После разработки структуры измерительного канала разрабатывается структура управляющего канала. В общем виде структура управляющей системы приведена на рис. 3.10.

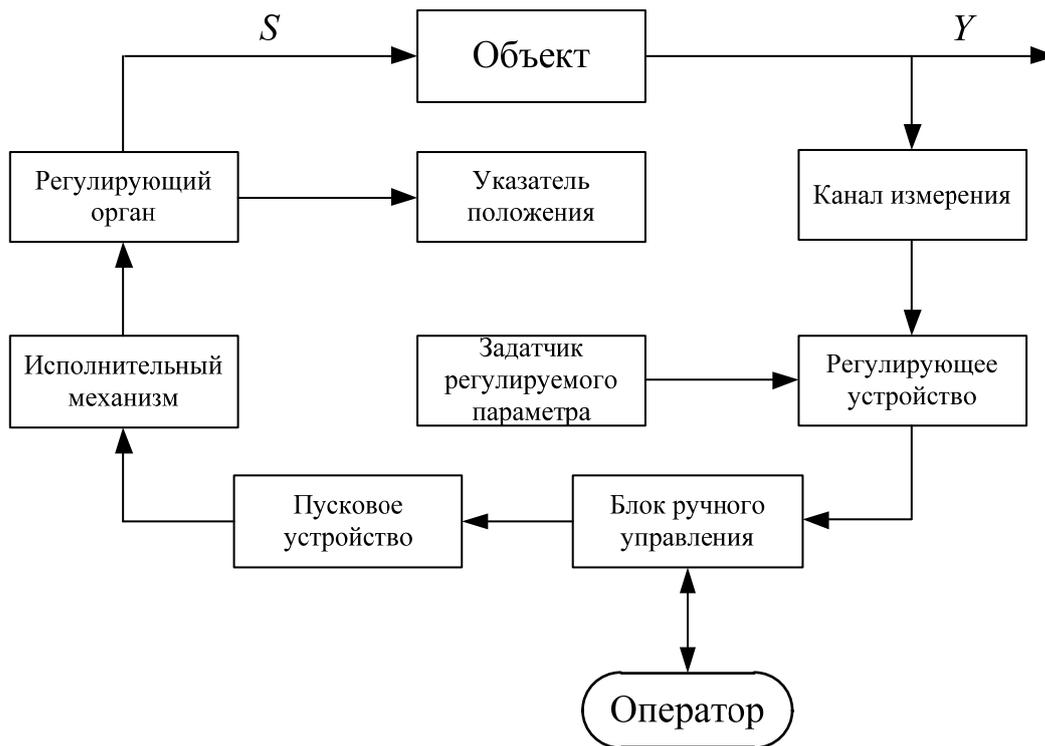


Рис. 3.10. Структурная схема автоматизированной системы управления технологическим процессом

На вход регулирующего устройства от измерительного канала поступает текущее значение регулируемого параметра и заданное значение этого параметра, формируемое с помощью задатчика регулируемого параметра. При появлении отличия между этими значениями – рассогласования – регулирующее устройство вырабатывает воздействие, которое направлено на уменьшение появившегося рассогласования и приближение регулируемого параметра к заданному значению. Управляющее воздействие через блок ручного управления поступает на пусковое устройство. Блок ручного управления имеет два режима работы и выступает в роли коммутатора цепей. Так, в автоматическом режиме работы управление регулирующим органом выполняется регулирующим устройством, в ручном режиме работы управление осуществляется оператором. Пусковое устройство предназначено для усиления сигнала до уровня, необходимого для запуска исполнительного механизма, который, в свою очередь, воздействует на регулирующий орган.

Если АСУ ТП построена на основе микропроцессорного контроллера, связанного с автоматизированным рабочим местом оператора с помощью SCADA-системы, то выполнять переключение режима работы между ручным и автоматическим, а также задавать значения регули-

емого параметра можно напрямую при помощи мнемосхемы. Структурная схема описанной системы показана на рис. 3.11.

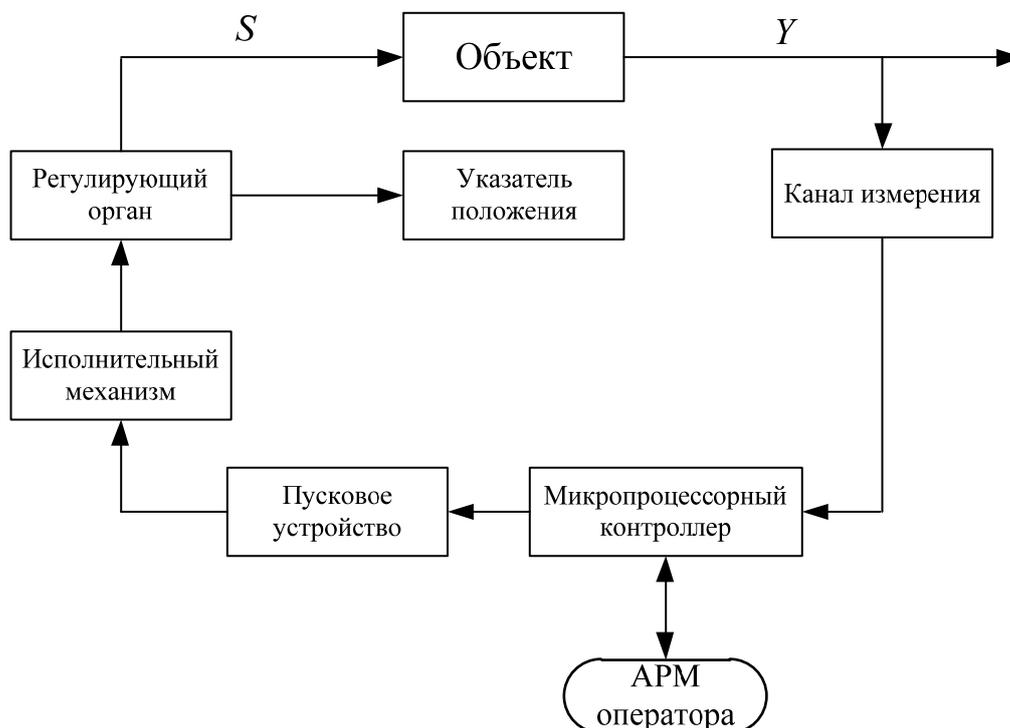


Рис. 3.11. Структурная схема автоматизированной системы управления технологическим процессом на основе контроллера

Таким образом, на этапе разработки структурной схемы решается ряд важных вопросов, причем принятые на этом этапе проектные решения должны сохраняться и учитываться во всех документах АСУ ТП.

Задание на работу

Дано: автоматическая система регулирования параметра технологического процесса.

Требуется: разработать структурную схему заданной АСР, схему представить на листе формата А3, работа оформляется в соответствии с требованиями, изложенными в [13].

№ варианта	АСР	Значение регулируемого параметра
1	АСР давления в ПНД	0,3 МПа
2	АСР давления в ПВД	2,5 МПа
3	АСР давления в деаэраторе	0,7 МПа
4	АСР уровня в деаэраторе	1,9 м
5	АСР температуры сетевой воды	115 °С

6	АСР уровня в сетевом подогревателе	0,8 м
7	АСР уровня в ПВД	0,6 м
8	АСР уровня в конденсаторе	1,3 м
9	АСР температуры пара после РОУ	350 °С
10	АСР давления пара после РОУ	10 МПа
11	АСР уровня воды в парогенераторе	2,45 м
12	АСР уровня в ПНД	0,7 м
13	АСР давления в ПНД	0,25 МПа
14	АСР давления в ПВД	1,8 МПа
15	АСР давления в деаэраторе	0,68 МПа
16	АСР уровня в деаэраторе	2,0 м
17	АСР уровня воды в парогенераторе	2,4 м
18	АСР температуры пара после РОУ	365 °С
19	АСР давления пара после РОУ	11,2 МПа
20	АСР уровня в конденсаторе	1,2 м

3.11. Разработка функциональных схем систем автоматического регулирования

Функциональные схемы являются основным техническим документом, определяющим функционально-блочную структуру отдельных узлов автоматического контроля и управления технологическим процессом и оснащение объекта управления приборами и средствами автоматизации.

При разработке функциональных схем систем автоматизации в числе прочих решаются следующие задачи:

- получение основной информации об объекте управления и технологическом процессе;
- определение управляющего воздействия на технологический процесс;
- контроль и регистрация параметров технологических процессов и состояния оборудования.

Эти задачи решаются на основе анализа условий работы технологического оборудования, законов и критериев управления объектом, требований, предъявляемых к точности контроля и регистрации, а также качеству регулирования.

Функциональные схемы разрабатываются с учетом структурных схем, при этом решается вопрос размещения средств автоматизации на технологическом оборудовании, на щитах управления.

Технологическое оборудование, коммуникации на функциональных схемах изображаются упрощенно, отдельные технологические аппараты и трубопроводы, имеющие вспомогательное назначение, на функциональных схемах не показываются. При этом функциональная схема должна содержать полную информацию о принципе работы системы и взаимодействии средств автоматизации.

На технологических трубопроводах показывается только та регулирующая и запорная арматура, которая непосредственно принимает участие в контроле и управлении технологическим процессом, а также запорные и регулирующие органы, которые необходимы для определения расположения мест отбора сред или поясняющие необходимость измерений.

Технологические аппараты и трубопроводы, имеющие вспомогательное назначение, изображаются только тогда, когда имеют механическую связь или взаимодействуют со средствами автоматизации.

Рядом с датчиками, отборными устройствами указывается наименование того технологического процесса, к которому они относятся.

Технологические трубопроводы жидкости и газа содержат цифровое обозначение среды, проходящей через трубопровод, обозначения приведены в источнике [13].

Рядом с изображениями технологического оборудования, отдельных его элементов и трубопроводов приводятся поясняющие надписи (наименование оборудования и т. п.), а также стрелками показывается направление движения среды.

Средства автоматизации на функциональных схемах изображаются в виде окружностей. Причем каждому изображению присваивается условное обозначение.

Правила изображения технологических объектов и средств автоматизации, а также методика построения условных обозначений приведены в источнике [13].

При построении условных обозначений приборов указываются не все функциональные признаки прибора, а только те, которые используются в данной схеме.

Помимо условных обозначений, всем приборам и средствам автоматизации присваиваются позиционные обозначения, которые сохраняются во всех документах проектов, в т. ч. в спецификации.

Функциональные схемы выполняются в виде чертежей, содержащих схематические условные обозначения технологического оборудования, органов управления и средств автоматизации, коммуникаций, связей между технологическим оборудованием и техническими средствами автоматизации.

Функциональные схемы автоматизации могут разрабатываться с большей или меньшей степенью детализации. Такие схемы выполняются на одном листе, при этом вспомогательное оборудование (реле, автоматы, выключатели, предохранители и др.) не показываются.

Функциональные схемы могут быть выполнены с помощью одного из двух способов. В соответствии с первым способом щиты и пульты управления изображаются в виде прямоугольников, как правило, в нижней части листа. Все технические средства автоматизации, которые устанавливаются на щитах и пультах изображаются внутри прямоугольников. При использовании второго способа технические средства автоматизации изображаются в непосредственной близости к отборным и приемным устройствам [12].

Примеры выполнения функциональных схем приведены в литературе [12,13].

Задание на работу

Дано: автоматическая система регулирования параметра технологического процесса (см. индивидуальные задания из разд. 3.10).

Требуется: разработать с учетом указаний, приведенных в пособии [13], функциональную схему заданной АСР (с использованием разработанной структурной схемы).

3.12. Составление заказных спецификаций

При проектировании систем автоматизации выполняются спецификация оборудования и спецификация щитов и пультов. Обе спецификации выполняются в соответствии со стандартом [14].

Спецификация оборудования, изделий и материалов представляет собой текстовый проектный документ, который позволяет определить состав оборудования, материалов и изделий.

Спецификации предназначены для чтения проектной документации, составления на их основе заказной документации, организации из-

готовления щитовой продукции и подготовки производственных работ по монтажу технических средств автоматизации.

Спецификация составляется в табличной форме, содержащей следующие графы:

- позиционные обозначения оборудования, изделия, предусмотренные чертежами (функциональной схемой);
- наименование оборудования, изделия, материала, их технические характеристики и другие необходимые сведения;
- тип, марка оборудования, обозначение стандарта, технических условий или другого документа;
- количество оборудования, изделий.

Приборы в каждой группе записывают комплектами по каналам контроля и контурам автоматического регулирования. В пределах контура запись производится от первичных преобразователей, затем промежуточные преобразователи, функциональные блоки, регуляторы, исполнительные механизмы.

Аппаратура и устройства, поставляемые комплектно с приборами и регуляторами, включаются в спецификацию за соответствующими позициями после слов «Комплектно поставляются» [12].

Задание на работу

Дано: автоматическая система регулирования параметра технологического процесса (см. индивидуальные задания из разд. 3.10).

Требуется: разработать с учетом указаний пособия [13], заказную спецификацию приборов и средств автоматизации (с использованием разработанной функциональной схемы).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поляков К.Ю. Теория автоматического управления для «чайников» – СПб.: Питер, 2008. – 80 с.
2. Теория автоматического управления, часть 1 / под ред. Воронова А.А., – Москва: Высш. шк., 1977. – 153 с.
3. Ефимов М.В. Теория автоматического управления. – Москва: МГУП, 2006. – 420 с.
4. Клавдиев А.А. Теория автоматического управления в примерах и задачах, часть 1. – Санкт-Петербург: СЗГЗТУ, 2005. – 74 с.
5. Лазарева Т.Я., Мартемьянов Ю.Ф. Основы теории автоматического управления. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2004. – 256 с.
6. Андык В.С. Теория автоматического управления / В.С. Андык. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 108 с.
7. Косяк Ю.Ф. Эксплуатация турбин АЭС / Ю.Ф. Косяк, В.Н. Галацан, В.А. Палей. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 144 с.
8. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов ТЭС и АЭС. – Одесса: Астропринт, 2001. – 305 с.
9. Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 368 с.
10. Правила технической эксплуатации тепловых энергоустановок. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 112 с.
11. Береснев Г.М., Боровков В.М. Эксплуатация паротурбинных установок АЭС. – Л: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 264 с.
12. Проектирование систем автоматизации технологических процессов: Справ. пособие / А.С. Ключев, Б.В. Глазов, А.Х. Дубровский и др.; под ред. А.С. Ключева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 464 с.: ил.
13. Волощенко А.В. Проектирование систем автоматического контроля и регулирования: учеб. пособие / А.В. Волощенко, Д.Б. Горбунов; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 108 с.
14. ГОСТ 21.110–95 Правила выполнения спецификации оборудования, изделий и материалов. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 8 с.

Учебное издание

АТРОШЕНКО Юлиана Константиновна
ИВАНОВА Евгения Владимировна

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АЭС

Учебное пособие

Научный редактор
кандидат технических наук В.С. Андык

Корректурa *Н.Т. Синельникова*
Компьютерная верстка *В.В. Михалев*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Подписано к печати 23.06.2014. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 4,71. Уч.-изд. л. 4,26.
Заказ 760-14. Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета
сертифицирована в соответствии с требованиями ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru