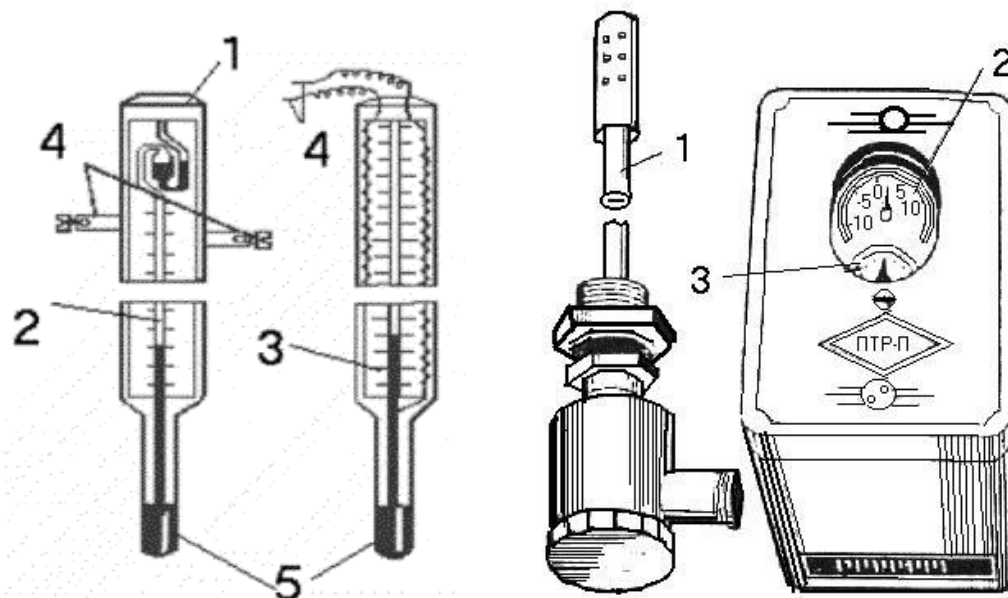


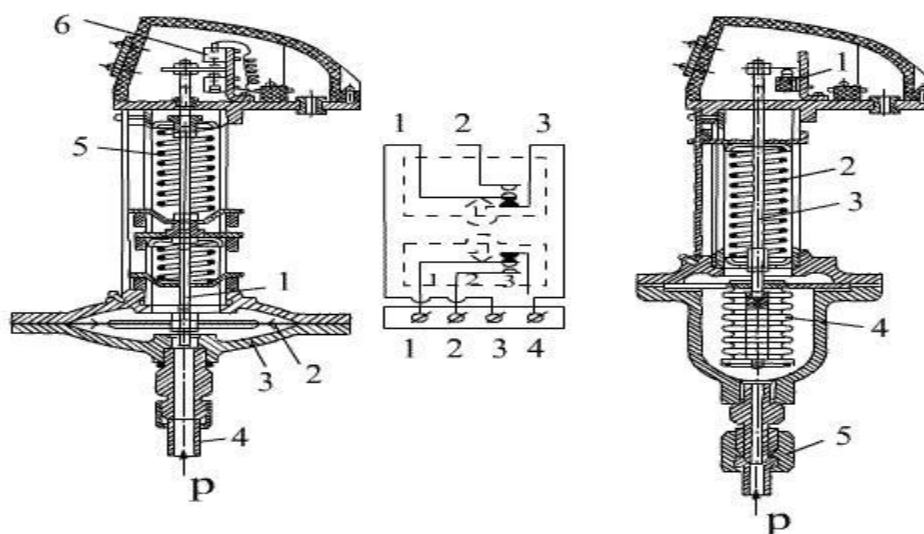
МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
ИРКУТСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ



Лукина Г.В.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ

Методическое пособие



Иркутск 2009

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
ИРКУТСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ**

Лукина Г.В.

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ**

**Методическое пособие
для студентов дневной и заочной форм обучения специальностей
110302.65 «Электрификация и автоматизация сх»
140106.65 «Энергообеспечение предприятий»**

Иркутск 2009

УДК 631.37: 620.92 (075)

Утверждено

Методическим советом Иркутской государственной сельскохозяйственной академии, протокол № 8 от 13.04.09 г.

АВТОР – *Лукина Галина Владимировна*, к.т.н., доцент кафедры электроснабжения и теплоэнергетики Иркутской государственной сельскохозяйственной академии

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ. Методическое пособие. Разработано с учетом требований Минобразования РФ и учебно-методического объединения вузов по агроинженерному образованию в качестве методического пособия для самостоятельной работы студентов высших учебных заведений по специальности 110302.65 «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства», 140106.65 – «Энергообеспечение предприятий». – Иркутск, ФГОУ ВПО, ИрГСХА, 2009. –158 с.

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

1. Суслов К.В. – к.т.н., доцент кафедры электроснабжения и электротехники Иркутского государственного технического университета.
2. Шипицына В.М. – ст. преподаватель кафедры автоматизации и электротехники Иркутской государственной с/х академии.

При разработке методического пособия были использованы материалы Ключева А.С. и др. авторов

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Иркутская государственная сельскохозяйственная академия», 2009.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	6
1.1 Основные понятия и определения.....	6
1.2 Регуляторы уровня жидкости и центробежный регулятор скорости вращения.....	13
1.3 Функциональная схема систем автоматического управления..	
1.4 Классификация систем автоматического управления.....	14
2 ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ.....	19
2.1 Фундаментальные принципы регулирования.....	19
2.2 Основные законы регулирования.....	22
2.3 Основные принципы построения САР и основные виды.	23
3 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ.....	37
3.1 Уравнения динамики и статики. Линеаризация.....	37
3.2 Типовые воздействия. Оператор преобразования Лапласа.....	40
3.3 Форма записи линейных дифференциальных уравнений. Передаточные функции.....	42
3.4 Характеристики звеньев САР.....	45
3.5 Элементарные (типовые) звенья и их характеристики.....	48
3.6 Структурные схемы и передаточные функции САР.....	49
4 УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ. КРИТЕРИЙ УСТОЙЧИВОСТИ.....	56
4.1 Постановка задачи исследования устойчивости.	56
4.2 Алгебраические критерии устойчивости.....	59

4.3 Частотные критерии устойчивости. Устойчивость разомкнутых и замкнутых САУ.....	61
4.4 Качество управления САУ.....	64
5 СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ.....	71
5.1 Назначение автоматического контроля.....	71
5.2 Погрешности измерений.....	74
5.3 Первичные и вторичные приборы автоматического контроля.....	76
5.4 Местный и дистанционный контроль. Роль и назначение систем.....	78
6 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИГНАЛИЗАТОРЫ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ.....	84
6.1 Сигнализаторы.....	84
6.2 Сигнализаторы температуры.....	85
6.3 Сигнализаторы давления.....	92
7 АВТОМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	96
7.1 Автоматические регуляторы.....	96
7.2 Классификация регуляторов.....	98
7.3 Позиционные регуляторы.....	98
7.4 Интегральные регуляторы.....	100
7.5 Пропорциональные регуляторы.....	105
7.6 Пропорционально-интегральные регуляторы.....	109
7.7 Дифференциальные регуляторы.....	113
8 ПРИНЦИПЫ СОСТАВЛЕНИЯ СХЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ.....	117
8.1 Стадии разработки конструкторской документации.....	117
8.2 Условные обозначения в функциональных схемах автоматического контроля и управления.....	119
8.3 Щиты и пульты управления.....	128

8.4 Назначение и содержание функциональных и электрических схем. Мнемонические схемы.....	130
9 АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ.....	135
9.1 Задачи и принципы автоматизации.....	135
9.2 Автоматизация теплоподготовительных установок и котельных... 	136
9.3 Автоматизация насосных подстанций.....	141
9.4 Автоматизация узлов горячего водоснабжения.....	141
9.5 Автоматическое регулирование процессов горения	144
9.7 Регулирование перегрева пара.....	147
ЛИТЕРАТУРА.....	154

ВВЕДЕНИЕ

Энергетическим объектам принадлежит ведущая роль в техническом вооружении народного хозяйства, так как на базе энергетических объектов развиваются все отрасли промышленности, повышается производительность труда.

Создание комплексных автоматических систем и быстродействующих вычислительных машин являются важным этапом научно – технического прогресса. Использование средств автоматики и вычислительной техники позволяет автоматизировать трудоемкие процессы, экономить энергоресурсы, снижает себестоимость продукции и повышает ее качество.

Уровень и качество автоматического контроля, регулирования и сигнализации, определяет точность и надежность измерительных приборов. Одним из этапов повышения качества и надежности автоматических устройств является уменьшение габаритных размеров. Применение в автоматизированном контроле микропроцессоров, позволяет разработать микроавтоматические устройства, которые позволяют создавать и внедрять в промышленность миниатюрные электронные управляющие машины и промышленные приборы.

Система управления технологических процессов в основном базируется на элементной базе, содержащей электрические, электронные, электромеханические, магнитные, гидравлические и другие устройства. В последние десятилетия особенно интенсивное развитие получили электронные устройства автоматики. Шире внедряются компьютеры в системы управления, что подняло уровень автоматизации производственных процессов на новую, более высокую ступень. На базе микропроцессорной техники стало возможным внедрение самонастраивающихся и самообучающихся автоматических систем, реализующих сложные законы управления.

1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1.1 Основные понятия и определения.

1.2 Регуляторы уровня жидкости и центробежный регулятор скорости вращения.

1.3 Функциональная схема систем автоматического управления.

1.4 Классификация систем автоматического управления.

1.1 Основные понятия и определения

Автоматизация технологических процессов – означает измерение и контроль технологических процессов, преобразование неэлектрических параметров в электрические, регистрация технологических параметров, передача информации, принятие решения и управление состоянием объектов.

Основными параметрами технологических процессов являются температура, давление, уровень, масса, объем, расход, качество, состав и другие электрические и неэлектрические величины.

Для контроля величин этих параметров необходимо вести измерения непрерывно. Результаты измерений сравниваются с требуемыми значениями контролируемого параметра, а если имеются отклонения, то подается сигнал об отклонении. Отклонения могут быть положительными или отрицательными, уменьшения или повышения и так далее. По отклонениям принимается решение и сигнал подается на объект управления. В процессе принятия решения могут участвовать человек-оператор или устройство.

Под управлением понимают такую организацию процесса, которая обеспечивает заданный характер протекания процесса.

При этом сам процесс (совокупность технических средств – машин, орудий труда, то есть исполнителей конкретного процесса) – с точки зрения управления, является *объектом управления (ОУ)*, а переменные, характеризующие состояние процесса, называются *управляемыми переменными* или *управляемыми величинами*.

Автоматическое управление (регулирование) - это осуществление какого-либо процесса без непосредственного участия человека, с помощью соответствующих систем автоматики. Если автоматическое управление призвано обеспечить изменение (поддержание) управляемой величины по заданному закону, то такое автоматическое управление называют автоматическим регулированием.

Технические устройства, выполняющие операции управления (регулирования) – называются *автоматическими устройствами*.

Совокупность средств управления объектов образует *систему управления*.

Систему, в которой все рабочие и управляющие операции выполняют автоматические устройства, называют *автоматической системой*.

Условно автоматическую систему можно разделить на две части: *регулятор и объект управления (ОУ)* (рис. 1.1).

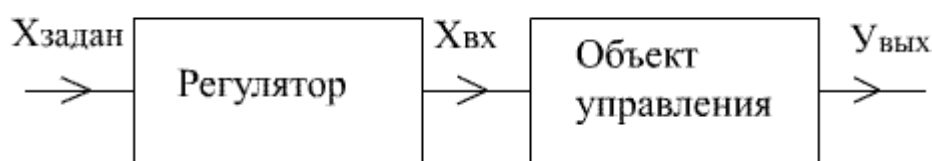


Рисунок 1.1- Функциональная схема САУ

Объектами управления могут быть жидкость в резервуаре, уровень или расход которой требуется контролировать; паропроводы у которых контролируются давление, температура, скорость пара; генератор – выходная мощность, ток обмотки возбуждения; двигатель- скорость вращения вала и т.д.

Воздействия, прикладываемые к регулятору для обеспечения требуемых значений управляемых величин, являются *управляющими воздействиями*. Управляющие воздействия называют также *входными величинами*, а управляемые – *выходными величинами*. Таким образом, всякий

технический процесс характеризуется совокупностью физических величин, называемых *показателями* или *параметрами процесса*.

Величины, характеризующие состояния объекта управления, схематически можно показать следующим образом (рис.1.2):

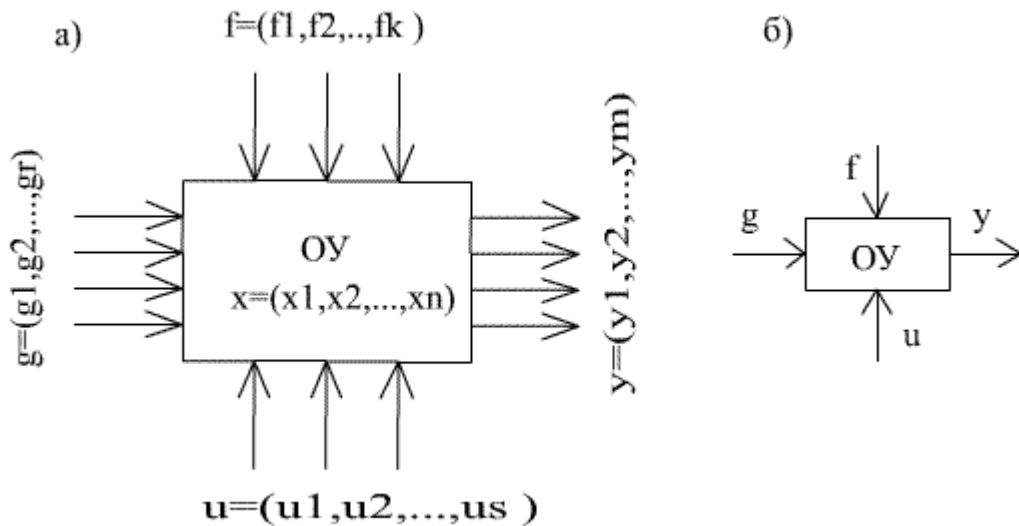


Рисунок 1.2 – Величины, характеризующие состояние объекта управления где $G=\{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ - вектор совокупности контролируемых воздействий; $F=\{f_1, f_2, \dots, f_k\}$ – вектор неконтролируемых воздействий; $U=\{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ – вектор управляющего воздействия; $Y=\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ - вектор управляемых величин.

Рассмотрим приведенные определения и понятия на конкретном примере, в качестве которого возьмем систему регулирования частоты вращения электродвигателя постоянного тока (рис. 1.3а). Здесь ОУ является процесс вращения электродвигателя M , характеризуемый частотой вращения w . Изменение величины w достигается изменением напряжения $U_{я}$, подводимого к якорю электродвигателя. Очевидно, что величина $U_{я}$ и величина w будут максимальными, если ползунок m потенциометрического реостата Π окажется в крайнем нижнем положении. При перемещении ползунка, m в крайнее верхнее положение $U_{я}=0$; $w=0$. Таким образом, перемещая ползунок m от крайнего нижнего положения в крайнее верхнее, можно изменять частоту вращения w от максимального значения до нуля.

Для удобства контроля частоты вращения, с валом электродвигателя связан вал тахогенератора **BR** –электрического генератора, преобразующего величину ω в напряжение $U_{BR}=K_{BR}\omega$. Вольтметр **PV**, включенный на напряжение тахогенератора U_{BR} , градуируется в единицах измерения частоты вращения (рад/с) или скорости вращения вала электродвигателя (мин^{-1}).

Представленная на рис. 1.3а, система регулирования является *разомкнутой*, а регулирование в ней осуществляется по *разомкнутому циклу*. Разомкнутая система характеризуется тем, что изменения регулируемой величины не передаются на вход системы и не изменяют значения регулирующей (управляющей) величины. Регулирование в разомкнутой системе осуществляется с участием человека - оператора (Оп), который, наблюдая за значением регулируемой величины по регистрирующему прибору, устанавливает также значение регулирующей величины, которое необходимо для обеспечения заданного режима работы системы. Таким образом, в рассмотренной разомкнутой системе осуществляется ручное, неавтоматическое регулирование.

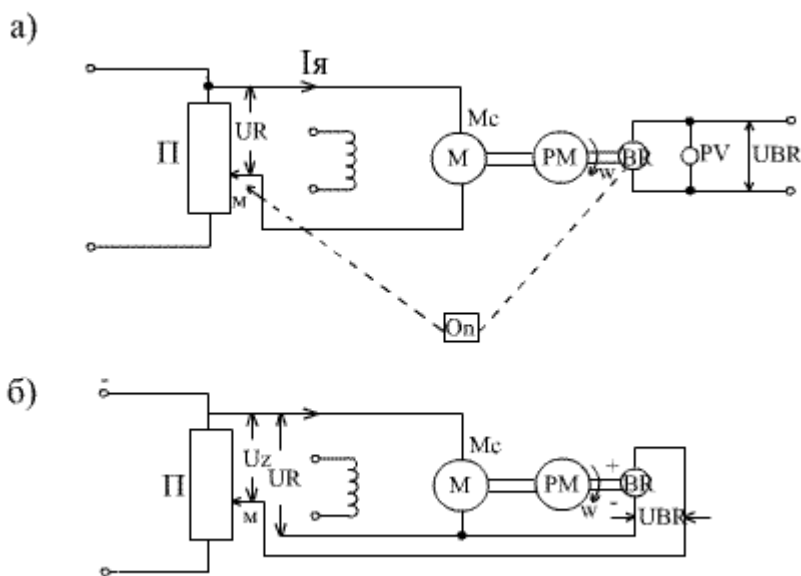


Рисунок 1.3 - САР частоты вращения электродвигателя постоянного тока

Для обеспечения автоматического регулирования необходимо провести замыкание системы, что достигается введением в систему *обратной связи*,

под которой понимают совокупность устройств (в данном примере цепь **П-М-ВР-П**), передающих изменения выходной (регулируемой) величины на вход системы. Таким образом, разомкнутая система регулирования (рис.1.3а) превращается в *замкнутую* (рис.1.3б). При этом необходимо соблюдать условия $U_{я}=U_3-U_{ВР}$, где U_3 – задающее напряжение, снимаемое с потенциометра, в данном случае является входной величиной. При возрастании момента сопротивления M_c на валу электродвигателя, определяемого условиями работы рабочей машины РМ, частота вращения ω уменьшатся. Это вызовет уменьшение величины $U_{ВР}$ и последующее автоматическое возрастание величины $U_{я}$ согласно уравнению $U_{я}=U_3-U_{ВР}$ и, следовательно, увеличение ω .

Таким образом, в системе возникают условия автоматического поддержания выходной величины на заданном уровне, устанавливаемом соответствующим положением ползунка. Очевидно, что при уменьшении значения M_c и возрастании частоты вращения значение $U_{я}$ будет автоматически уменьшаться, обеспечивая вновь автоматическое регулирование ω .

1.2 Регуляторы уровня жидкости и центробежный регулятор скорости вращения

С целью регулирования и управления состояниями объектов разрабатывались различные регуляторы. В 1765 году И.И. Ползуновым впервые был изобретен регулятор уровня воды (рис. 1.4), затем в 1784 году шотландский инженер Дж. Уатт (James Watt, 1736-1819) создал центробежный регулятор скорости вращения (рис. 1.5).

Принцип действия регулятора уровня следующий: регулируемым (контролируемым) параметром является уровень жидкости H_0 в резервуаре. Регулирующим воздействием является поток жидкости Q_1 , который

протекает по трубе и через проходное сечение в игольчатом клапане 3 поступает в бак.

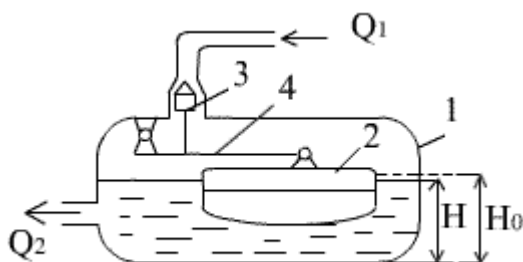


Рисунок 1.4 - Принципиальная схема регулятора уровня воды: 1 – объект управления; 2 – поплавков – измерительный элемент; 3 – игла – исполнительный элемент.

Возмущающим воздействием является расход жидкости Q_2 вытекающий из бака. В регуляторе имеется поплавок 2, соединенный с рычагом 4. В этом рычаге 4 связана игла 3. При изменении значения расхода жидкости (нагрузка), т.е. при нарушении баланса между Q_1 и Q_2 , наблюдается отклонение уровня жидкости в баке от установившегося его значения. Меняется положение поплавка 2, изменяется проходное сечение под иглой 3 и соответственно с этим изменяется поступления жидкости так, что снова восстанавливается исходный уровень. Если изменение уровня вызывается изменением нагрузки, то восстановление будет неполным. С увеличением нагрузки Q_2 , для поддержания заданного уровня H_0 проходное сечение под иглой 3 переводится в новое положение. При этом рычаг 4 и поплавков 2 тоже занимают новое положение. Это положение отличается от исходного, т.е. появляется погрешность регулирования $\Delta H = H_0 - H$, которая называется статической погрешностью регулирования.

Принцип действия центробежного регулятора (рис. 1.5) следующий. При увеличении скорости вращения механизма скорость вращения вала начинает расти. Под действием возросшей центробежной силы расходятся грузы 2, преодолевая силу пружины 3 чувствительного элемента регулятора, муфта 4 регулятора поднимается кверху и игла 1 опускается вниз.

Уменьшится подача топлива в двигатель и уменьшается скорость вращения вала двигателя.

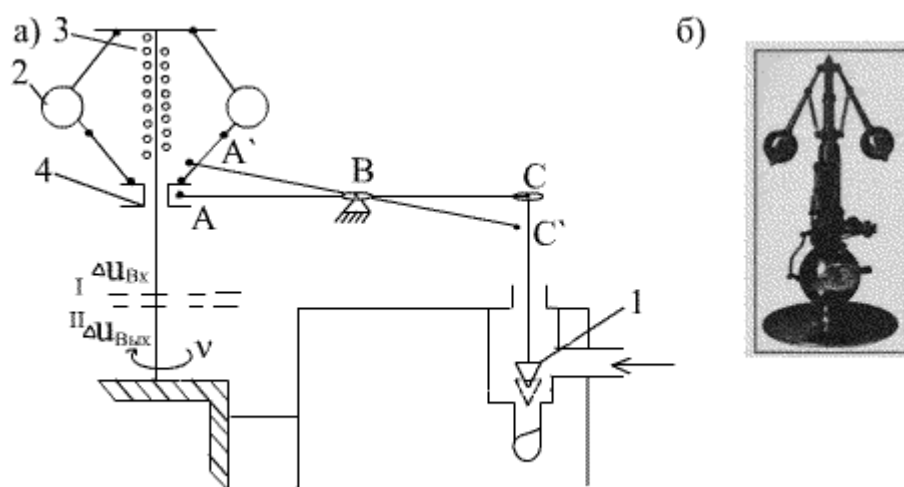


Рисунок 1.5 - Схема центробежного регулятора скорости вращения, где 1–Игла–исполнительный элемент; 2–груз–измерительной элемент; 3–пружина – чувствительный орган; 4 – муфта.

Таким образом, регулятор противодействует изменению регулируемой величины – скорости вращения и стремится стабилизировать ее значение.

Эти регуляторы до сих пор применяются в промышленности. Регуляторы уровня применяются сейчас в автомобильных карбюраторах. Центробежные регуляторы скорости вращения имеются в автомобильных дизельных двигателях, паровых турбинах, двигателях реактивных самолетов. Они предназначены для стабилизации режима работы.

1.3 Функциональная схема систем автоматического управления

Разделение САУ на отдельные элементы целесообразно, так как, это позволяет более экономично осуществлять разработку (синтез) САУ и ее анализ. Разделение позволяет определить функциональную сущность отдельных элементов САУ, и представляется возможность построить

функциональную схему САР. Из приведенного примера видно, что устройство управления для поддержки состояния объекта в данном (требуемом) уровне выполняет следующие функции:

- Преобразовать – усилить сигнал;
- Сравнивать с заданием;
- Показывать, усилить;
- Принять решения и использовать;

Из этого можно получить функциональную схему САУ или САР.

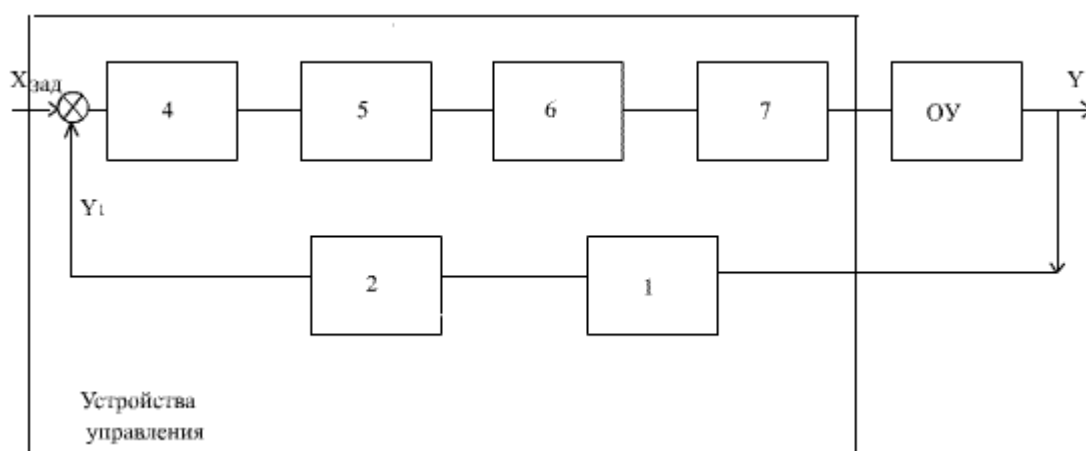


Рисунок 1.6 - Функциональная схема САУ

где 1-датчик; 2-преобразующие-усиливающие устройства; 3- сравнивающий элемент; 4-усилитель; 5-усиливающее-преобразующие устройства; 6- исполнительный механизм; 7-регулирующий орган.

1.4 Классификация систем автоматического управления

Сложность современных автоматических систем не позволяет их однозначную классификацию, так как ряд классификационных признаков оказывается присущим САУ различных типов.

1) САР по цепи передачи сигналов могут быть замкнутыми или разомкнутыми (рис. 1.7).

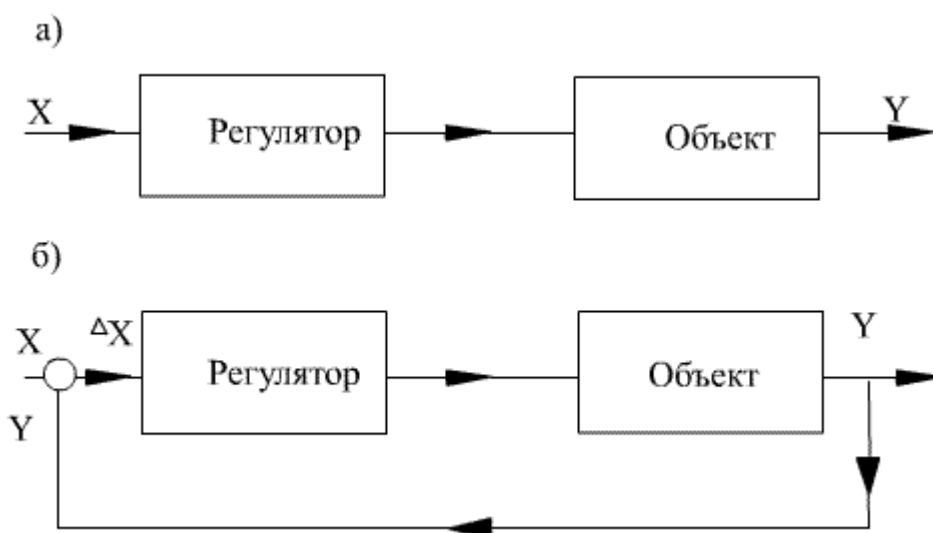


Рисунок 1.7 - Функциональные схемы разомкнутой а) и замкнутой б) САР

В *замкнутых* САР в процесс функционирования непрерывно или через определенные промежутки времени на суммирующее устройство поступают сигналы, определяющие величину регулируемого параметра, а в *разомкнутых* САР такая информация отсутствует. Примером разомкнутых САР могут быть системы автоматов по продаже газированной воды, система обеспечения заданного теплового режима в помещении в зависимости от температуры наружного воздуха и т.д.

2) По характеру управляющего воздействия системы подразделяются на:

- Системы автоматической стабилизации (САС);
- Системы программного управления (СПУ);
- Следящие системы (СС).

В САС управляющее (входное) воздействие не изменяется во времени, т.е. $x_{вх} = \text{const}$. Такая система обрабатывает возникающие отклонения регулируемой величины от заданного. Именно такое регулирование обеспечивается в САР.

В СПУ управляющее (входное) воздействие изменяется во времени по заданному закону. Такие системы применяются для управления процессами, характер протекания которых известен.

В СС характер изменения управляющего воздействия определяемый процессами, происходящими вне системы, не может быть определен. Следящие системы используются для отработки возмущений, характер которых неизвестен заранее.

3) *По характеру математического описания статистических и динамических режимов САУ* подразделяются на *линейные* и *нелинейные*.

Линейные САУ описываются в статике линейными алгебраическими уравнениями, а в динамике – линейными дифференциальными уравнениями. Один из характерных признаков линейных САУ – проявление принципа суперпозиции, заключающийся в том, что реакция линейной системы на несколько воздействий равна сумме реакций на каждое из воздействий в отдельности.

Нелинейные САУ описываются нелинейными уравнениями. Реальные системы относятся к типу нелинейных, однако теория линейных систем в значительной степени создает предпосылки для разработки теории нелинейных САУ.

4) *По характеру связи между входной и выходной величинами САУ* подразделяется на *непрерывные* и *прерывистые (дискретные, импульсные и релейные)*. В *непрерывных САУ* между выходными и входными величинами существует непрерывная функциональная зависимость. В *прерывистых САУ* непрерывному изменению регулируемого параметра соответствует выходная величина в виде:

- последовательности импульсов, амплитуды, длительности и частоты повторений, которые зависят от значения входной величины и характера импульсного элемента;
- скачкообразного сигнала, который появляется лишь при определенных значениях входной величины.

5) *По числу регулируемых переменных САУ* подразделяются на *одномерные* (с одной регулируемой величиной) и *многомерные* (с несколькими

регулируемыми величинами). *Многомерные САУ* подразделяются на системы несвязанного и связанного регулирования. В многомерных системах несвязанного регулирования различные регулируемые величины не имеют взаимной связи. В многомерных системах связанного регулирования регуляторы различных переменных взаимосвязаны между собой и через общий объект регулирования. Примером многомерной САУ может служить САУ работы парового котла, в которой осуществляется регулирование подачи воды, топлива и воздуха в форсунки.

6) *По числу обратных связей САУ* подразделяются на *одноконтурные* и *многоконтурные*. *Одноконтурные САУ* имеют одну обратную связь – жесткую, главную отрицательную обратную связь, охватывающую всю систему от входа до выхода. *Многоконтурные* системы помимо главной жесткой отрицательной обратной связи имеют еще одну или более местные обратные связи, как жесткие, так и гибкие, как отрицательные, так и положительные, охватывающие часть системы.

7) *По величине ошибки в установившемся состоянии САУ* подразделяются на *статические* и *астатические*.

В *статических САУ* в установившихся режимах имеет место отклонение регулируемой величины от заданного значения.

Астатическими называют САУ, обеспечивающие регулирование без статической ошибки.

8) *По назначению системы:*

- Системы с поиском экстремума показателя качества;
- Системы оптимального управления;
- Адаптивные системы;

9) *По зависимости времени состояния объекта:*

- Статические (статика, безинерционные);
- Динамические (инерционные).

10) По изменению величины параметра по времени:

- Стационарные;
- Нестационарные.

11) По источнику энергии:

- Электрические;
- Пневматические;
- Гидравлические и т.д.

12) По способу воздействия измерительного элемента на регулирующий элемент:

- САУ прямого действия;
- САУ непрямого действия.

13) По виду регулируемого параметра:

- САР температур;
- САР давления;
- САР уровня влажности и т.д.

Кроме того, возможны и другие признаки классификации.

2 ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

2.1 Фундаментальные принципы регулирования.

2.2 Основные законы регулирования.

2.3 Основные принципы построения САУ и основные виды.

2.1 Фундаментальные принципы регулирования

В основе построения САУ (САР) лежат некоторые общие фундаментальные принципы управления, определяющие, каким образом осуществляется увязка алгоритмов функционирования и управления (регулирования) с фактическим функционированием или причинами, вызывающими отклонение функционирования от заданного. Принцип регулирования определяет способ формирования управляющего воздействия в САУ.

В простейшем случае регулирование (управление) осуществляется на основе заранее известных заданий регулирования (алгоритм управления). Этот принцип можно называть как принцип *разомкнутого* регулирования. Сущность принципа состоит в том, что алгоритм управления вырабатывается только на основе заданного алгоритма функционирования и не контролируется другими факторами – возмущениями или управляемыми (выходными) координатами процесса (рис.- 2.1).

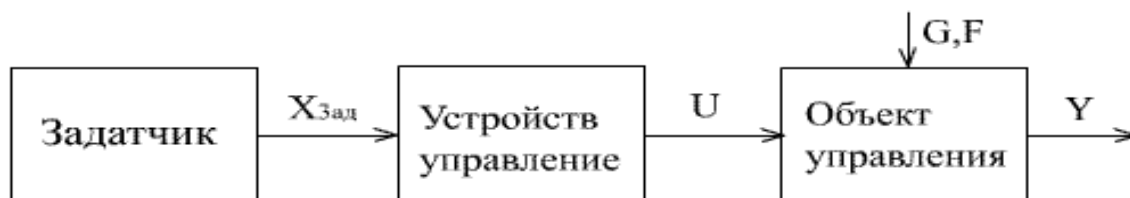


Рисунок 2.1 - Функциональная схема разомкнутой САУ

В разомкнутой цепочке воздействие передается от входного элемента (задатчика алгоритма управления и управляющего устройства) к выходному элементу (объект управления). Близость Y и $X_{зад}$ в разомкнутых системах обеспечивается только конструкцией и подбором физических закономерностей, действующих во всех элементах.

Когда возмущающие воздействия (G, F) велики, разомкнутая цепь не обеспечивает требуемой точности выполнения алгоритма функционирования. Несмотря на очевидные недостатки, этот принцип используют очень широко. Элементы, представляемые разомкнутой цепью, входят в состав любой системы, поэтому принцип представляется настолько, что его не всегда выделяют как один из фундаментальных принципов.

При регулировании *по отклонению* регулируемой величины от заданного значения (принцип Ползунова-Уатта) управляющие воздействия возникают вследствие отклонения регулируемой величины (Y) от заданного значения, передающегося на вход системы по цепи обратной связи. В системах регулирования по отклонению контролируется прямо регулируемая величина (Y) и алгоритм функционирования обеспечивается без измерения возмущений. Это дает возможность вырабатывать управляющие воздействия независимо от причины, вызывающей изменения регулируемой величины (рис. 2.2).

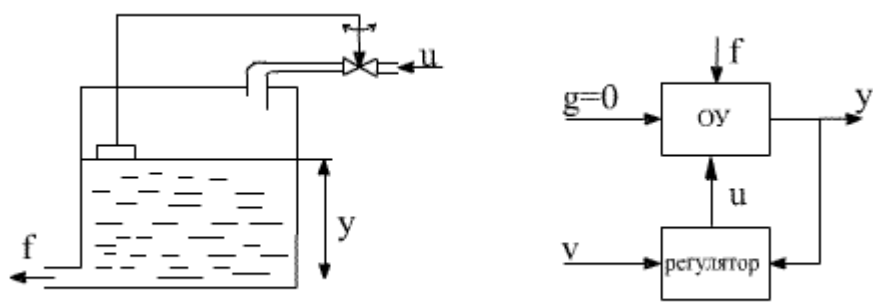


Рисунок 2.2 - Принципиальная и функциональная схема САР по отклонению

Схема имеет вид замкнутой цепи, что дало основание назвать осуществляемый в ней принцип регулирования по замкнутому контуру.

Алгоритм управления осуществляется по значениям отклонения регулируемой величины от заданных значений, определяемых алгоритмом функционирования V .

Недостаток регулирования по отклонению – это инерционность процесса регулирования, обусловленная тем, что обычно, проходит определенное время от момента приложенного возмущения к системе до того момента, когда накопится отклонение регулируемой величины, достаточное для воздействия на регулятор.

При регулировании *по возмущению нагрузки* осуществляется измерение возмущения и при отклонении возмущения от некоторого обусловленного значения в системе возникает управляющее воздействие, реализуемое так же, как в системах регулирования отклонений (рис.-2.3).

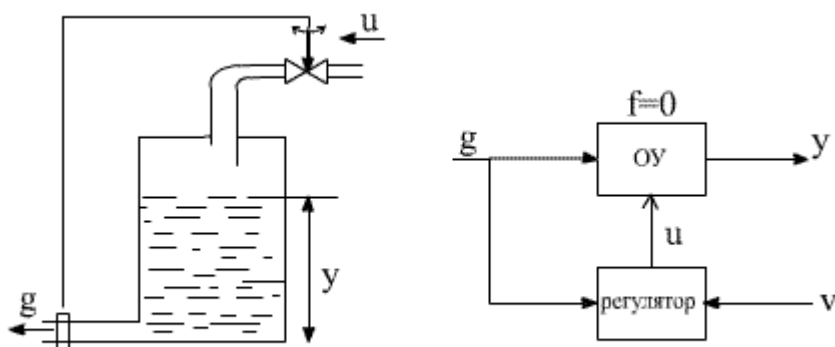


Рисунок 2.3 - Принципиальная и функциональная схема САР по нагрузке

Достоинством регулирования по нагрузке является быстрая реакция системы на изменение нагрузки. Недостаток этого принципа вытекает из того, что процесс регулирования начинается лишь при изменении того возмущения, на измерения которого настроена САР. Другие возмущения вызывающие отклонения регулируемой величины, не будут обрабатываться системой. Кроме того, задача измерения нагрузки всегда не достижима.

Иногда с целью увеличения точности и быстроты регулирования применяется в конструирование САР *комбинированное* регулирование, в котором используются оба принципа – регулирования по отклонению и по

возмущению. Такие САР объединяют в себе достоинства, обусловленные обоими принципами регулирования, т.е. быстроту реакции на изменение возмущений и точное регулирование независимо от того, какая причина вызвала отклонение. Функциональная схема принципа комбинированного регулирования приведена на рис. 2.4.

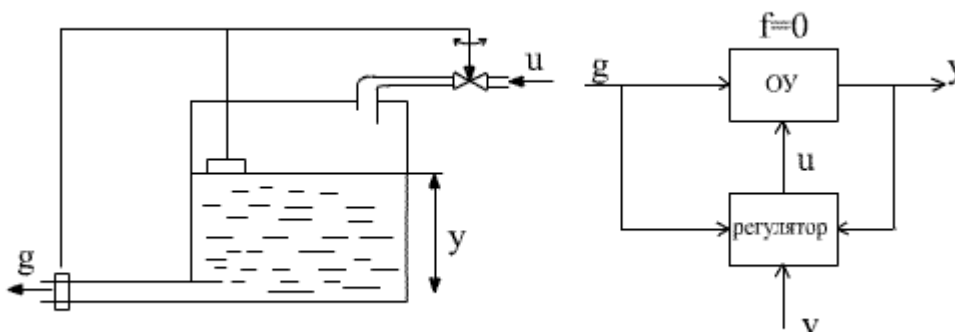


Рисунок 2.4 - Принципиальная и функциональная схема комбинированной САР.

2.2 Основные законы регулирования

Законом регулирования называют математическую зависимость, в соответствии с которой управляющее воздействие на объект вырабатывалось бы безинерционным управляющим устройством.

В технике используют довольно много различных законов регулирования, которые тесно связаны с конструкцией управляющего устройства, и одним из распространенных видов классификации регуляторов является классификация по законам управления. Здесь рассматриваем наиболее распространенные законы, реализуемые линейными регуляторами по отклонению непрерывного действия. В этих простейших законах управляющее воздействие линейно зависит от отклонения, его интеграла и первой производной по времени.

Пропорциональный закон (П): регулятор, осуществляющий этот закон, называют пропорциональным. Постоянную k_p называют

коэффициентом передачи (усиления) регулятора, обратную величину – статизмом регулятора. С возрастанием статизма регулятора возрастает и статизм регулирования.

$$\mu = \frac{1}{T} \int_0^t \varepsilon dt$$

Интегральный закон (И): Постоянная T имеет размерность времени, и ее называют постоянной времени интегрирования. Интегральный регулятор - астатический, и именно с его помощью осуществляется простейшая схема астатического регулирования.

$$\frac{d\mu}{dt} = \frac{\varepsilon}{T}$$

Пропорционально-интегральный закон (ПИ): регулятор ПИ также обеспечивает астатическое регулирование.

$$\mu = k_p \left(\varepsilon + \frac{1}{T} \int_0^t \varepsilon dt \right)$$

Пропорционально-интегрально-дифференциальный закон (ПИД):

$$\mu = k_p \left(\varepsilon + \frac{1}{T_I} \int_0^t \varepsilon dt + T_D \frac{d\varepsilon}{dt} \right)$$

Постоянные T_I и T_D соответственно называют постоянными времени интегрирования и дифференцирования. Регулятор ПИД так же обеспечивает астатическое регулирование.

2.3 Основные принципы построения САР и основные виды

По принципу построения САР могут быть:

- САР прямого и непрямого действия;
- САР непрерывные и прерывистые;
- Статические и астатические САР.

а) В САР *прямого действия* воздействие измерительного элемента на регулирующий элемент осуществляется непосредственно без привлечения добавочного источника энергии (рис. 2.5 и 2.6). На рис.2.5 представлена САР уровня воды в баке. В этой системе измерительный элемент (2) непосредственно через рычаг ABC воздействует на регулирующий элемент (3). В САР прямого действия энергия, необходимая для процесса регулирования, поступает только вследствие отклонения регулируемого параметра. САР прямого действия могут быть осуществлены только тогда, когда сигнал, создаваемый измерительным элементом, достаточен для непосредственного воздействия на регулирующий элемент.

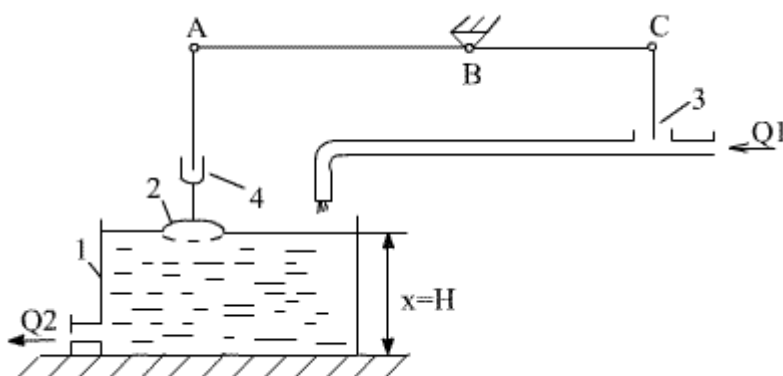


Рисунок 2.5 - САР уровня воды в баке прямого действия.

где 1-бак (регулируемый объект); 2-поплавок (измерительный элемент); 3-заслонка (регулирующий элемент); 4-задатчик; H -высота уровня воды (регулируемый параметр); Q_1 -приток воды в бак; Q_2 -расход воды из бака

Преимуществом системы является простота конструкции, надежность в работе, не требовании дополнительных источников энергии.

Недостатком системы является низкая чувствительность, малая точность регулирования, небольшой коэффициент усиления и ограниченная мощность на выходе.

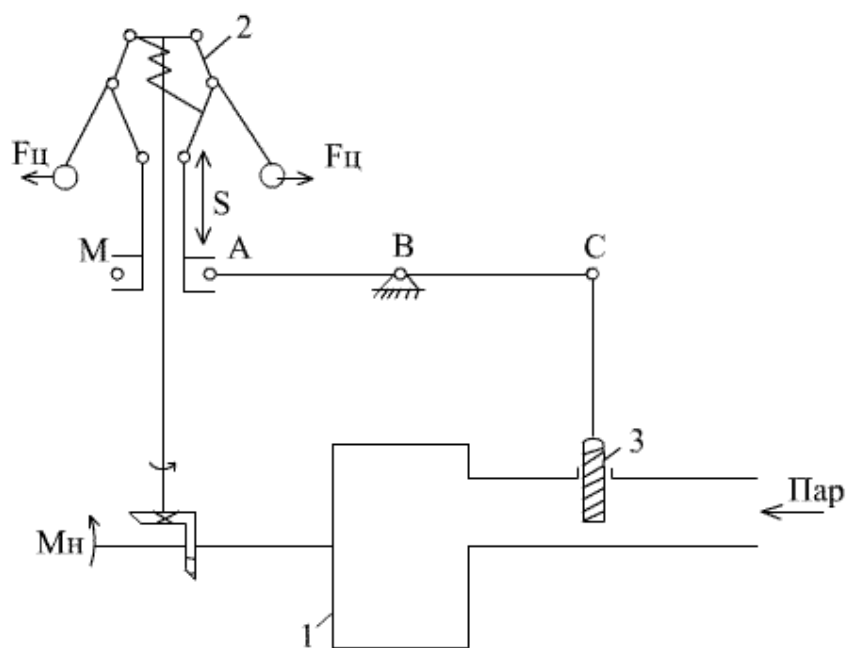


Рисунок 2.6 - САР частоты вращения вала теплового двигателя прямого действия.

где 1-двигатель (регулируемый объект); 2-центробежный механизм (измерительный элемент); 3-заслонка (регулирующий элемент).

б) В САР *непрямого действия* измерительный элемент воздействует на регулирующий элемент не непосредственно, а через специальные усиливающие элементы, питаемые добавочным источником энергии. Эти элементы вводятся для усиления сигналов, подаваемых измерительным элементом к регулируемому элементу, за счет постороннего источника энергии (рис. 2.7 и 2.8).

На рис. 2.7 представлена САР уровня воды в баке непрямого действия. Здесь в качестве добавочной энергии используется источник питания двигателя постоянного тока. В САР непрямого действия энергия, необходимая для процесса регулирования, поступает не только вследствие отклонения регулируемого параметра, но и от добавочного источника питания.

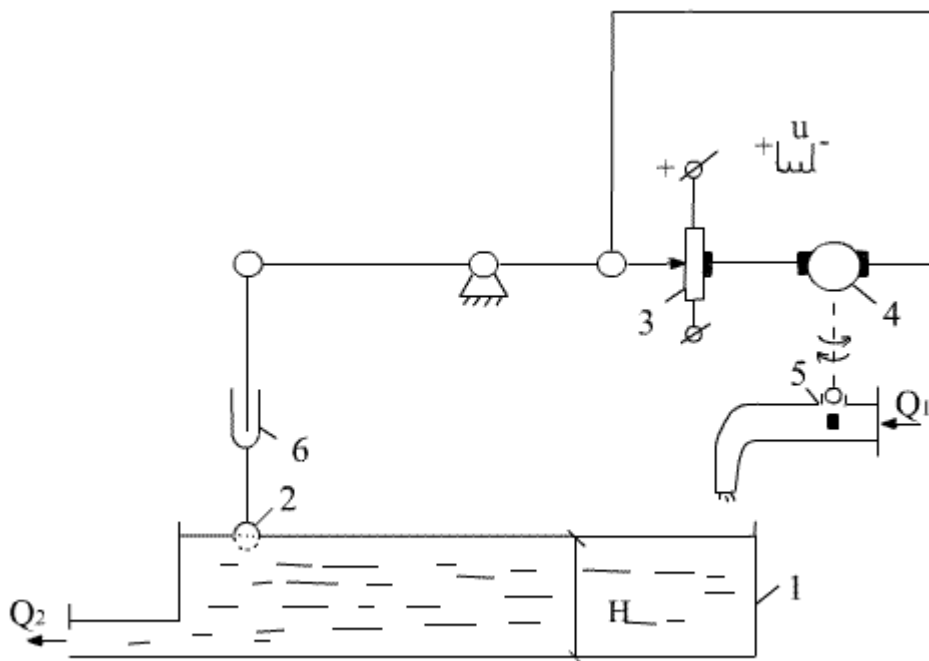


Рисунок 2.7 - САР уровня воды в баке непрямого действия где 1-бак (регулируемый объект); 2-поплавок (измерительный элемент); 3-потенциометр (преобразующий элемент); 4-электродвигатель (исполнительный элемент); 5-заслонка (регулирующий элемент); 6-здатчик.

Преимуществом системы является точность, большой коэффициент усиления, удовлетворяющий практическим требованиям чувствительности и точности регулирования.

Недостатком системы является сложность конструкции.

в) *Непрерывной* называется такая САР, в которой непрерывному изменению регулируемого параметра соответствует непрерывное изменение механических, электрических или других величин во всех элементах системы. Следовательно, в ней осуществляется постоянная, непрерывная функциональная связь между элементами (рис 2.8).

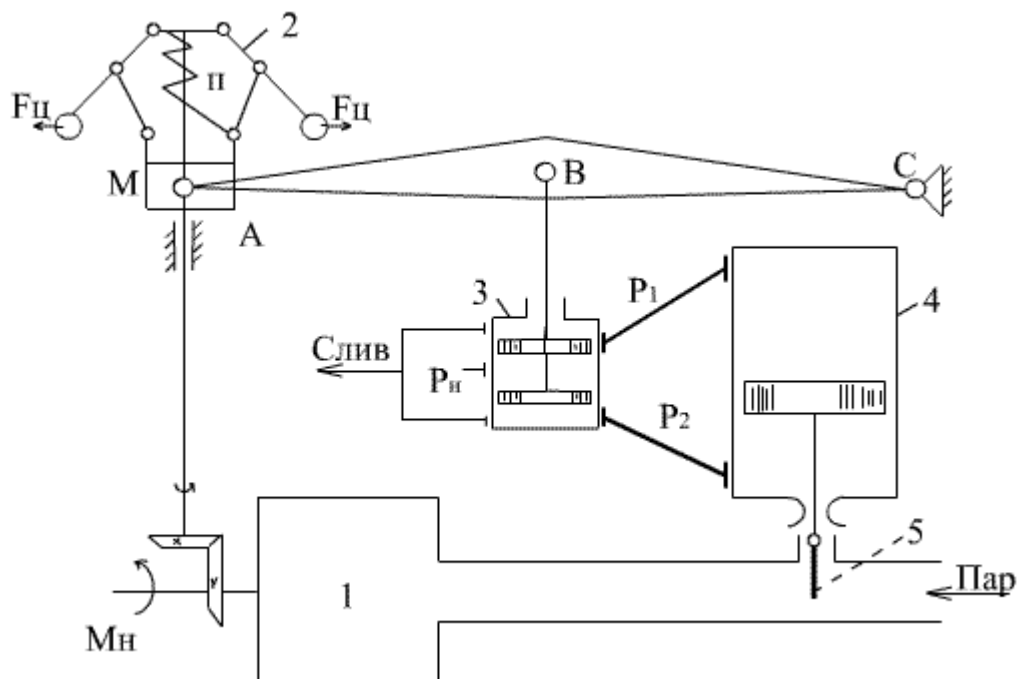


Рисунок 2.8 - САР частоты вращения вала теплового двигателя непрямого действия.

где 1-двигатель (регулируемый объект); 2-центробежный механизм (измерительный элемент); 3-золотник (преобразующий элемент); 4-гидравлический двигатель (исполнительный элемент); 5-заслонка (регулирующий элемент).

Например, в САР уровня воды в баке любым изменениям уровня воды соответствует перемещению измерительного элемента – поплавок, который воздействует на регулирующий элемент – заслонку. При непрерывном изменении уровня воды регулирующий элемент (заслонка) непрерывно воздействует на регулируемый объект – бак, так, что уровень воды поддерживается постоянным. Большинство подобных САР относится к классу линейных систем.

г) *Прерывистой* системой называется такая САР, в которой непрерывное изменение регулируемого параметра соответствует прерывистому изменению воздействия хотя бы в одном из элементов системы.

Прерывистую систему можно разделить на две группы: *релейные* и *импульсные*.

Релейные системы. В схемах (рис. 2.9 а) приведено включение электродвигателя через электромагнитного реле. Входная величина $X_{вх}$ подается на обмотку реле через сопротивление R . Если сопротивление R изменяется, то увеличивается $X_{вх}$ и при $X_{вх}=U_{ср}$ замыкает контакт K . В результате $X_{вых}$ изменяется скачкообразно и принимает свое номинальное значение. При уменьшении значения сопротивления R , значение $X_{вых}$ сохраняется до тех пор пока $X_{вх} \geq U_{отп}$; когда $X_{вх} = U_{отп}$ контакт K размыкается и $X_{вых}=0$. По статической характеристике (рис. 2.9 б) электромагнитного реле видно, что непрерывному изменению входной величины соответствует скачкообразное появление выходной величины.

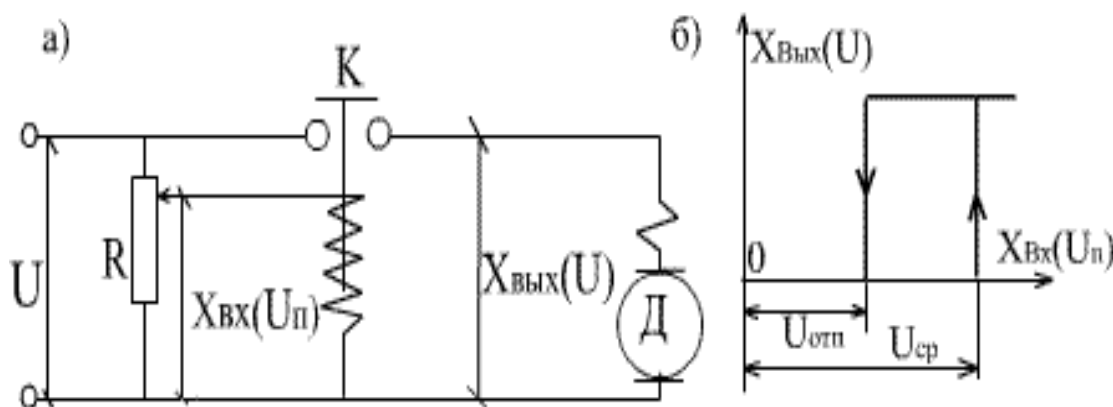


Рисунок 2.9 - Схема включения электродвигателя – а), и статическая характеристика - б).

В качестве примера релейной системы можно привести САР частоты вращения вала электродвигателя (рис.-2.10).

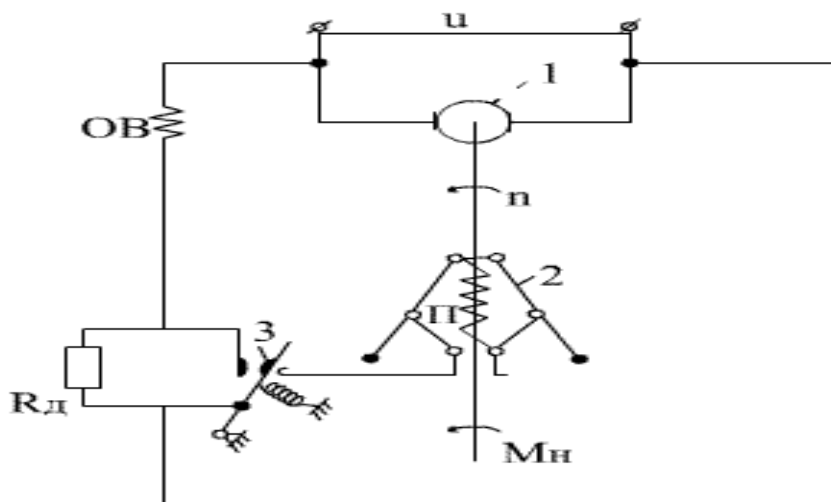


Рисунок 2.10- САР частоты вращения вала электродвигателя
 где 1-регулируемый объект (электродвигатель); 2-измерительный элемент (центробежный механизм); 3-регулирующий механизм (выключатель)

2) *Импульсные системы.* Рассмотрим импульсную САР температуры теплового двигателя (рис.2.11).

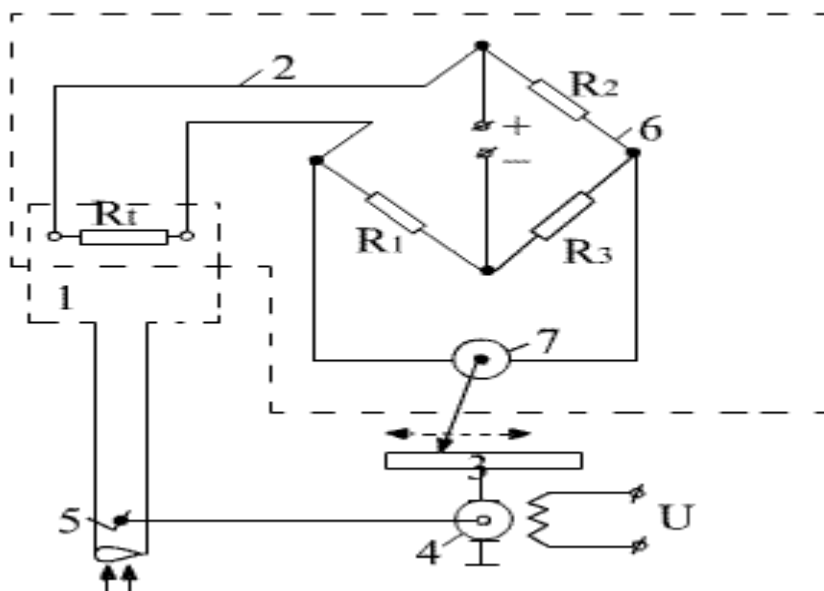


Рисунок 2.11 - Импульсная САР температуры теплового двигателя.
 где 1-регулируемый объект (тепловой двигатель); 2-измерительный элемент (электрический мост с гальванометром); 3-преобразующий импульсный элемент; 4-исполнительный элемент (электродвигатель); 5-регулирующий элемент (шторки радиатора); 6-мост; 7-гальванометр

При изменении регулируемого параметра – температуры, изменяется сопротивление R_t . Вследствие этого нарушается равновесие электрического моста и через гальванометр, включенный в диагональ моста 6, начинает поступать ток, что приводит к перемещению стрелки гальванометра 7. Стрелка воздействует на импульсный элемент 3, который вырабатывает и подает импульсы питания на электродвигатель 4, вследствие чего, происходит перемещение регулирующего элемента (шторки радиатора). Непрерывность нарушается в импульсном элементе, так как отклонение стрелки гальванометра, пропорционально силе тока, проходящего через диагональ моста, что приводит к образованию на выходе импульсов тока (выходной сигнал).

д) *Статические САР*. Примером такой системы является САР уровня воды в баке (рис. 2.5). При постоянном расходе воды Q_2 в единицу времени как поплавков, так и заслонка 3 неподвижны. Расход воды Q_2 равен количеству поступающей воды Q_1 . При увеличении расхода воды Q_2 уровень воды в баке понижается, поплавков 2 опускается и перемещает заслонку 3 вверх, увеличивая открытие допуска воды Q_1 . Вследствие этого поступление воды Q_1 в единицу времени увеличивается, и уровень воды в баке повышается. Равновесие в системе наступает тогда, когда поступление воды Q_1 будет равно ее новому расходу. Следовательно, чем больше расход воды, тем больше должна быть приоткрыта заслонка 3 и тем ниже в состоянии равновесия будет находиться поплавок 2. При уменьшении расхода воды заслонка 3 опускается, и поплавок 2 в состоянии равновесия будет находиться выше, чем он находился до уменьшения расхода воды Q_2 .

Статическая система автоматического регулирования напряжения генератора постоянного тока показана на рис. 2.12. При напряжении генератора 1, равном заданному значению, ползунок реостата 3, допустим, находится в положении I. При уменьшении напряжения генератора, нагруженного электродвигателем Д, втягивающее усилие, создаваемое током в витках обмотки электромагнита 2, подключенного к зажимам генератора,

уменьшится. Под воздействием пружины 4 якорь электромагнита переместится вниз, что вызовет перемещение ползунка реостата 3 в положение II. Сопротивление цепи обмотки возбуждения уменьшится, сила тока возбуждения возрастет, магнитный поток увеличится, что обеспечит восстановление напряжения.

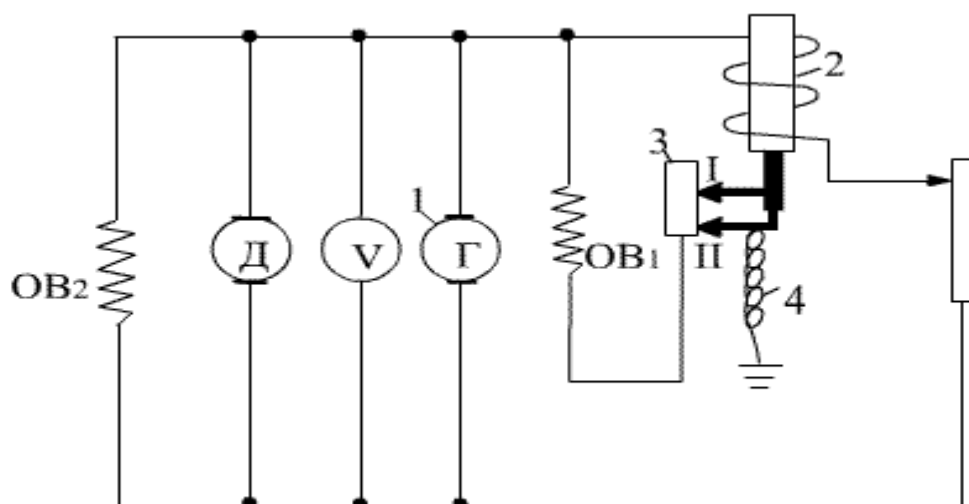


Рисунок 2.12 - САР напряжения генератора постоянного тока

Как видим, различным установившимся значениям силы тока нагрузки соответствуют различные установившиеся значения силы тока возбуждения, которые обеспечиваются различными установившимися положениями движка реостата 3. Однако для того, чтобы движок реостата 3 занимал различные установившиеся положения, в системе необходимы различные установившиеся значения тяговой силы электромагнита. В свою очередь, тяговая сила электромагнита пропорциональна приложенному напряжению. Вследствие этого каждому установившемуся значению силы тока нагрузки соответствует определенное установившееся значение напряжения генератора, т.е. при различных установившихся значениях силы тока нагрузки напряжение генератора будет различным.

Таким образом, в системах статического регулирования характерно, что различным установившимся значениям внешних возмущающих

воздействий на регулируемый объект соответствуют различные установившиеся значения регулируемого параметра или, иначе говоря, равновесие системы при статическом регулировании имеет место при различных значениях регулируемого параметра, лежащих в заданных заранее пределах. Характеристика статического регулирования имеет вид $x=x_0 + KQ$ (рис.2.13).

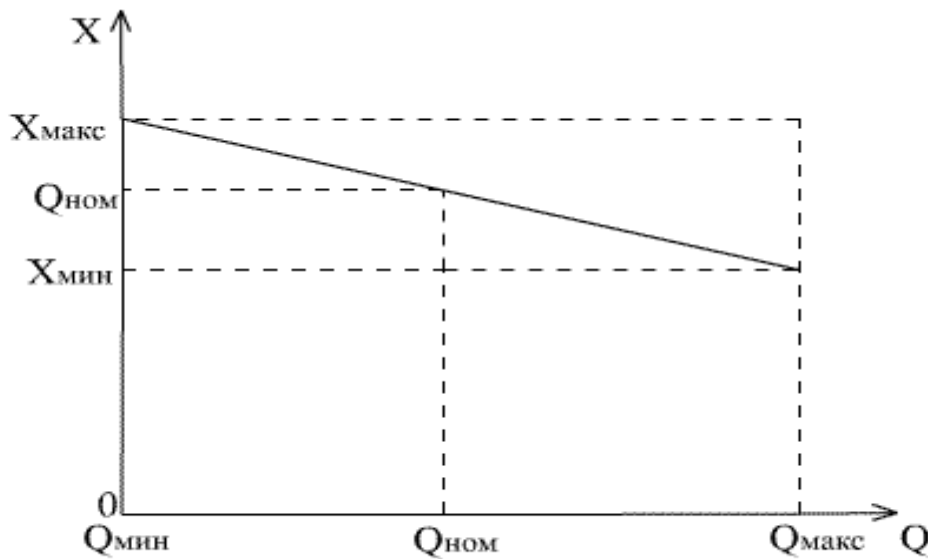


Рисунок 2.13 - Характеристика статического регулирования

Характеристикой статического регулирования называется зависимость регулируемого параметра от нагрузки при различных установившихся режимах.

Разность между каким-либо установившимся значением регулируемого параметра X и его номинальным значением $X_{ном}$ называют *абсолютной статической ошибкой*: $\Delta X = X - X_{ном}$.

Отношение абсолютной статической ошибки к номинальному значению $X_{ном}$ называют *относительной статической ошибкой*:

$$\frac{\Delta X}{X_{ном}} = \frac{X - X_{ном}}{X_{ном}}$$

Относительную ширину зоны называют *неравномерностью системы регулирования* δ

$$\frac{X_{\max} - X_{\min}}{X_{\text{ном}}}$$

е) *Астатические САР*. Астатической называется такая САР, в которой при различных по величине внешних возмущающих воздействиях на регулируемый объект, отклонение регулируемого параметра от заданного значения по окончании переходного процесса становится равным нулю. Следовательно, величина регулируемого параметра не зависит от изменения нагрузки на регулируемый объект.

Примером такой системы является САР уровня воды в баке, показанная на рис. 2.7. При постоянном расходе воды Q_2 из бака 1 в единицу времени как поплавков 2, так и заслонка 5 неподвижны, так как питание на электродвигатель 4 не подается и в данном случае $Q_2=Q_1$. При увеличении расхода воды Q_2 , уровень ее в баке понижается, поплавок 2 опускается и перемещает вверх ползунок потенциометра 3, электродвигатель получает питание и, вращаясь, приоткрывает заслонку 5, благодаря чему увеличивается доступ воды Q_1 в бак 1. Электродвигатель 4 будет вращаться и передвигать заслонку 5 вверх до тех пор, пока ползунок потенциометра 3 не займет нейтрального положения. В этом случае поплавок 2 займет положение, соответствующее заданному значению уровня воды в баке.

И так, в установившемся режиме при различных расходах воды Q_2 из бака, поплавок 2 всегда будет занимать одно определенное положение, соответствующее заданному значению уровня воды в баке, а заслонка 5 при различных установившихся значениях расхода воды из бака, будет занимать соответственно различные положения.

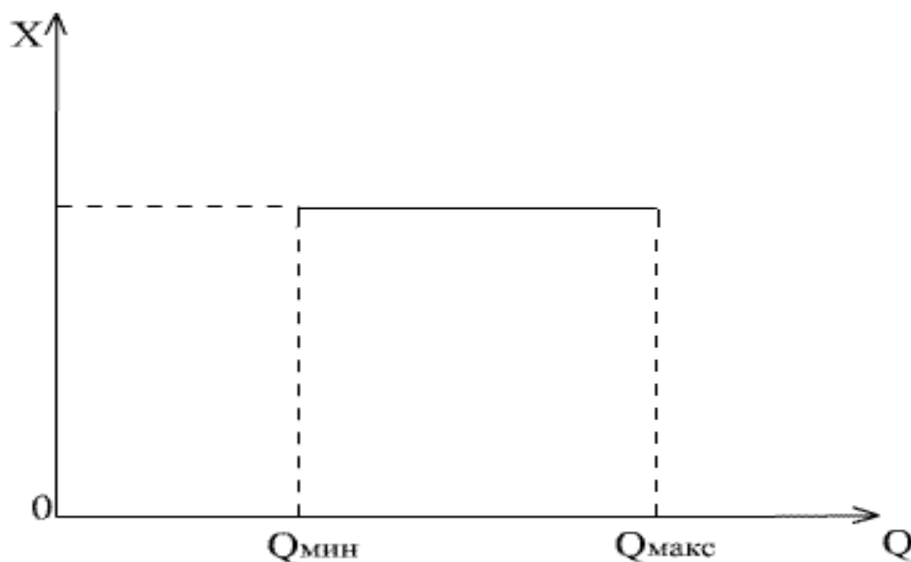


Рисунок 2.14 - Характеристика астатического регулирования.

Таким образом, различным установившимся значениям внешних возмущающих воздействий на регулируемый объект соответствует постоянное значение регулируемого параметра, равное заданному значению, или, иначе говоря, равновесие системы имеет место при единственном заданном значении регулируемого параметра (рис.2.14). Регулирующий элемент в конце процесса регулирования может находиться в любом положении, обеспечивающим равновесие системы регулирования.

Астатические САР более точно поддерживают заданное значение регулируемого параметра, но по сравнению с системами статического регулирования имеют более сложное конструктивное исполнение.

На первом этапе развития техники управления использовался практически лишь один вид автоматического управления - поддержание заданного постоянного значения регулируемой величины. Впоследствии число видов увеличивалось.

Система стабилизации Системы поддержания постоянства управляемой величины называют *системами стабилизации*. Желаемый закон в них имеет вид $\mathbf{x}_o(t)=\mathbf{const}$, здесь, $\mathbf{x}_o(t)$ - задание. В системе стабилизации регулируемые параметры сравниваются с эталоном (заданием) и

относительно по отклонению $\Delta x = x_0 - x$ вырабатываются решения. Регулирование по отклонению может уменьшить, но не устранить ошибку. Регулирование, в котором установившаяся ошибка при постоянном заданном значении x_0 зависит от нагрузки, называют статическим. С целью устранения ошибки в цепь регулирования вводят астатическое звено – интегрирующее звено.

Система программного управления. При программном управлении алгоритм функционирования задан и можно построить специальное устройство – датчик программы, вырабатывающее $x_0(t)$. В практике используют два вида систем программного управления: системы с временной программой и системы с пространственной программой.

Следящие системы. В следящих системах алгоритм функционирования заранее не известен. Обычно регулируемая величина в таких системах должна воспроизводить изменение некоторого внешнего фактора, и следить за ним. Следящая система может быть выполнена в соответствии с любым фундаментальным принципом управления и будет отличаться от соответствующей системы программного управления тем, что вместо датчика программы в ней будет помещено устройство слежения за изменениями внешнего фактора.

Системы с поиском экстремума показателя качества. В ряде процессов показатель качества или эффективности процесса может быть выражен в каждый момент времени функцией текущих координат системы, и управление можно считать оптимальным, если оно обеспечивает поддержание этого показателя в точке максимума, например настройку радиоприемника на частоту передающей станции по наибольшей громкости приема или по наибольшей яркости свечения индикаторной лампы.

Оптимальное управление. Оптимальное управление применяется в технических системах для повышения эффективности производственных процессов. Задача оптимального управления заключается в следующем: в области допустимых управлений U следует найти такое допустимое

управление u , на котором показатель качества достигает экстремального значения: **$J=\text{extremum}$** .

Управление, удовлетворяющее условиям критерия оптимальности, называют *оптимальным*; Систему управления, которая с позиций критерия оптимальности оказывается наилучшей среди всех других систем, называют *оптимальной*.

Адаптивные системы. Системы, автоматически изменяющие значение своих параметров или структур при непредвиденных изменениях внешних условий на основании анализа состояния или поведения системы так, чтобы сохранялось заданное качество ее работы, называют *адаптивными системами*. Адаптивные системы с изменением значений параметров иногда называют самонастраивающимися, а системы с изменением структуры и алгоритма управления – самоорганизующимися.

3 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

3.1 Уравнения динамики и статики. Линеаризация.

3.2 Типовые воздействия. Оператор преобразования Лапласа.

3.3 Форма записи линейных дифференциальных уравнений.

Передаточные функции.

3.4 Характеристики звеньев САР.

3.5 Элементарные (типовые) звенья и их характеристики.

3.6 Структурные схемы и передаточные функции САР.

3.1 Уравнение динамики и статики. Линеаризация

Основой теоретического анализа САР является ее математическое описание – математическая модель. При исследовании статики системы математическая модель призвана обеспечить расчет величины статической ошибки, а при исследовании динамики - определить основные показатели качества регулирования, прежде всего устойчивость и форму переходного процесса при типовых управляющих и возмущающих воздействиях. В статике каждое звено описывается алгебраическим уравнением.

Математическое описание САР основывается выходными величинами в установившихся режимах.

В динамике звенья описываются дифференциальными уравнениями. Для этого используются линейные дифференциальные уравнения. В реальных системах все звенья нелинейные. Однако во многих случаях математические

модели нелинейных систем могут быть преобразованы в линейные путем линеаризации характеристик звеньев и систем.

Любая система (звеньев) преобразует входной сигнал X на выходной сигнал Y , т.е. $y(t)=A*x(t)$. Здесь A – оператор, учитывающий взаимную связь между входным и выходным сигналами, $x(t) \rightarrow OX$, $y(t) \rightarrow OY$. Оператор, определяющий соответствие между входным и выходным сигналами системы управления (элемента), называется *оператором этой системы*. Задать оператор системы – это значит задать правило определения выходного сигнала этой системы по ее входному сигналу.

Если звено описывается дифференциальным уравнением второго порядка, то уравнение имеет следующий вид:

$$a_0 \frac{d^2 y_1}{dt^2} + a_1 \frac{dy_1}{dt} + a_2 y_1 = b_0 \frac{dU_1}{dt} + b_1 U_1 + f$$

В общем виде

$$F(y, \overset{*}{y}, \overset{**}{y}, u, \overset{*}{u}) + f = 0$$

где y -выходные величины;

u и f – входные величины;

$\overset{*}{y}$ и $\overset{*}{u}$ - первые производные по времени;

$\overset{**}{y}$ вторая производная по времени.

Это уравнение, описывающее процессы в звене при произвольных входных воздействиях, называют *уравнением динамики*.

Допустим, что при постоянных входных величинах

$$U = U^0 \text{ и } f = f^0$$

процесс в звене с течением времени установится: выходная величина примет постоянное значение

$$y = y^0$$

Тогда

$$F(y_0, 0, 0, U^0, 0) + f^0 = 0$$

Это уравнение описывает статический или установившийся режим и его называют *уравнением статики*.

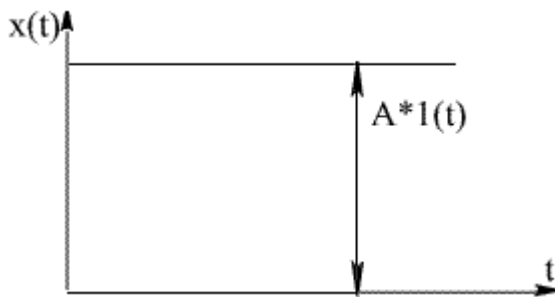
Обычно автоматические системы, описывают нелинейными дифференциальными уравнениями. Но во многих случаях можно их линеаризовать, т.е. заменить исходные нелинейные уравнения линейными, приближенно описывающими процессы в системе. Процесс преобразования нелинейных уравнений в линейные называют *линеаризацией*. В теории автоматического регулирования широко используются два метода линеаризации, позволяющие заменить нелинейные математические модели их линейными приближениями.

Первый метод заключается в том, что нелинейные функции, отражающие соотношения различных переменных в САУ, раскладываются в ряды Тейлора в окрестностях точек, характеризующих рассматриваемые режимы. Линеаризацию можно производить по звеньям. При линеаризации нелинейной части рядов, содержащиеся отклонения величин от их значений в точке разложения во второй и более высоких степенях, отбрасываются. Второй способ линеаризации нелинейных характеристик звеньев САУ сводится к тому, что из уравнений звеньев, составленных для режима при малых отклонениях переменных от равновесного положения, вычитаются уравнения равновесного состояния. Полученные таким путем сравнения в приращениях дают линеаризованное описание процессов, протекающих в САУ. В дальнейшем, учитывая назначения курса, ограничимся в основном элементами теории линейных САУ (САУ), в которых реальные звенья и системы могут быть отражены их линейными моделями, получаемыми на основе линейных уравнений.

3.2 Типовые воздействия. Оператор преобразования Лапласа

С целью анализа САР на вход системы подается сигнал и изучается реакция системы (звена) на это воздействие. В основном используются следующие типовые воздействия:

1) Ступенчатое (единичное) воздействие.

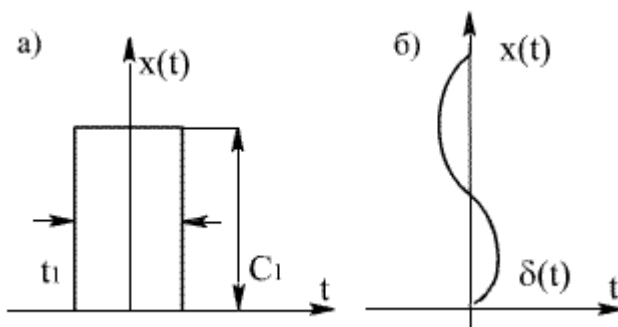


Ступенчатое воздействие при $t=0$ изменяется, и принимает значение $A=const$, а при $t>0$ значение воздействия остается неизменным, т.е.

$$X(t) = \begin{cases} A*1(t), & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}$$

Рисунок 3.1 - Ступенчатое воздействие

2) Единичное импульсное воздействие;



Импульсное воздействие является мгновенным импульсом и имеет площадь равную единице.

$$\begin{aligned} t_1 &\rightarrow 0 \\ C_1 &\rightarrow \infty \\ t_1 C_1 &= 1 \end{aligned}$$

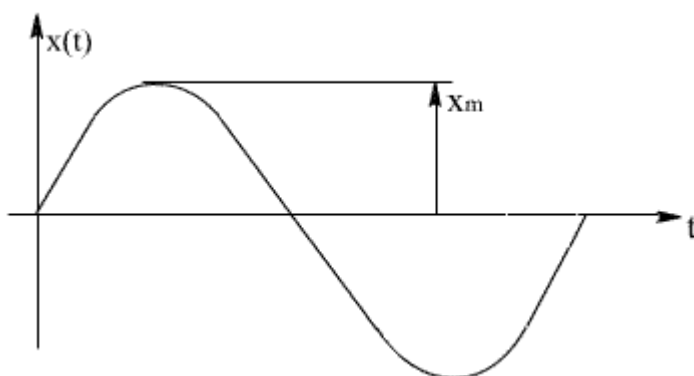
Рисунок 3.2 - Импульсное воздействие (дельта-функция)

Импульсное воздействие называется также дельта – функцией:

$$X(t)=d(t):$$

$$\int_0^{\infty} \sigma(t) dt = 1$$

3)Синусоидальное (гармоническое) воздействие.



Описываемое по формуле $X(t)=\sin\omega t$ воздействие называется синусоидальным.

Рисунок 3.3 - Синусоидальное (гармоническое) воздействие

В линейной теории автоматического регулирования наиболее широкое распространение получили частотные методы исследования САР, опирающиеся на анализ линейных дифференциальных уравнений САР, представленных не в действительных переменных, а в их изображениях по Лапласу или Карсону. В дальнейшем будем использовать уравнение САР в форме изображения переменных по Лапласу. При этом исходная переменная как функция времени называется оригиналом $f(t)$, а ее преобразование по Лапласу – изображением $F(P)$, где P – комплексная переменная, отвечающая известным условиям преобразования по Лапласу. Перевод от вида действительных переменных в операторный вид называется преобразованием Лапласа и описывается по следующему соотношению:

$$F(p) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt$$

где $f(t)$ – вещественная переменная, $F(p)$ – комплексная переменная $p=b+jw$.
 Функцию $f(t)$ – называют оригиналом, $F(p)$ - изображением или изображением по Лапласу. Используется следующее символическое обозначение $F(p) \text{ Ю}f(t); F(p) \rightarrow f(t); F(p)=L\{f(t)\}$, где L –оператор Лапласа.

Если оригинал имеет изображение, то это изображение имеет оригинал, т.е. от изображения можно определить с помощью обратного преобразования Лапласа оригинал:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma_0 - j\infty}^{\sigma_0 + j\infty} F(p) e^{pt} dt$$

$$f(t) = L^{-1} \{F(p)\}$$

В практике, исследование САР, L-преобразование осуществляется при нулевых начальных условиях, т.е. при условии, когда преобразуемая функция и все производные обращаются в нуль при $t=0$.

Пример.

$$f(t) = 1$$

$$F(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} dt = -\frac{1}{p} \left(\left. e^{-pt} \right|_{t=0}^{t=\infty} \right) = \frac{1}{p}$$

Если $y(t) = \frac{dx}{dt}$, при нулевых начальных условиях $Y(p)=Px(p)$.

Отсюда видно, что символ $d/dt=P$.

3.3 Форма записи линейных дифференциальных уравнений.

Передаточные функции

При описании автоматических систем управления широко используют символическую форму записи линейных дифференциальных уравнений. Если объект описывается дифференциальным уравнением 2-го порядка, т.е.

$$a_0 y^{**} + a_1 y^* + a_2 y = b_0 U + b_1 \dot{U}$$

Заменяя множитель d/dt на P получим

$$a_0 P^2 y + a_1 P y + a_2 y = b_0 P u + b_1 u$$
$$(a_0 P^2 + a_1 P + a_2) y = (b_0 P + b_1) u ;$$

здесь $(a_0 P^2 + a_1 P + a_2) = A(p)$ - называют собственным оператором (дифференциальный оператор при выходной величине);

$(b_0 P + b_1) = B(p)$ - оператор воздействия (дифференциальный оператор при входных величинах).

С помощью этих обозначений уравнение можно записать в более компактной форме

$$A(p) y = B(p) u .$$

Эти уравнение называют уравнениями в символической или операторной форме записи. При записи и преобразовании дифференциальных уравнений оператор (операцию дифференцирования) P можно рассматривать как алгебраический сомножитель, а выражение PY - как произведение, не обладающее свойством коммутативности: нельзя вместо PY писать YP .

Отношение оператора воздействия к собственному оператору называют *передаточной функцией* или *передаточной функцией в операторной форме*; или же *передаточной функцией звена (системы)* называют отношение преобразованной по Лапласу величины на выходе звена (системы) к преобразованной по Лапласу входной величине на входе, при нулевых начальных условиях:

$$W(p) = \frac{B(p)}{A(p)} = \frac{b_0 p + b_1}{a_0 p^2 + a_1 p + a_2};$$

$$W(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0 s + b_1}{a_0 s^2 + a_1 s + a_2}.$$

$$T_2 = \frac{b_0}{b_1};$$

$W(s)$ – уравнение называют уравнением в форме изображений Лапласа. Обычно линейные дифференциальные уравнения с постоянными коэффициентами не выше второго порядка записывают в стандартной форме. При этом члены, содержащие выходную величину и ее производные, записывают в левой части уравнения, а все остальные члены – в правой; коэффициент при выходной величине делают равным единице. Если в правой части содержатся производные, то члены, содержащие какую-либо одну входную величину и ее производные, объединяют в одну группу и коэффициент при соответствующей входной величине выносят за скобки.

Уравнение $a_0^{**} y + a_1^* y + a_2 y = b_0 U + b_1 \dot{U}$ в стандартной форме принимает вид

$$T_0^2 y + T_1 \dot{y} + y = k_1 (T_2 \dot{u} + u),$$

где $T_0^2 = \frac{a_0}{a_2}$; $T_1 = \frac{a_1}{a_2}$; $k_1 = \frac{b_1}{a_2}$; $T_2 = \frac{b_0}{b_1}$; $k_2 = \frac{c_0}{a_2}$.

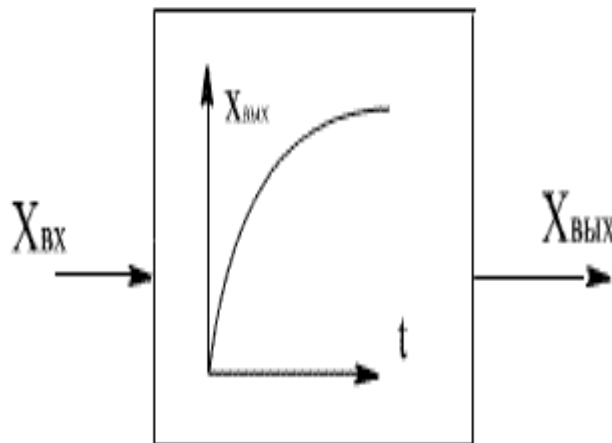
Постоянные T_0 , T_1 , и T_2 имеют размерность времени и их называют *постоянными времени*, а коэффициенты k_1 и k_2 – передаточными коэффициентами. Если исходное уравнение не содержит свободный член y ($a_2=0$), то в стандартной форме коэффициент при производной y должен быть равен единице: обе части уравнения делят на коэффициент a_2 . В

символической форме $T_0^2 y + T_1 \dot{y} + y = k_1 (T_2 \dot{u} + u)$ принимает вид

$$(T_0^2 P^2 + T_1 P + 1) y = k_1 (T_2 P + 1) u$$

3.4 Характеристики звеньев САР

Всякое автоматическое устройство состоит из отдельных элементов, выполняющих самостоятельные функции. В этих элементах изменение значения одной физической величины приводит к изменению другой физической величины. Изменение одной величины, производится под действием другой. В центробежном механизме изменение частоты вращения вала приводит к изменению перемещения муфты, но перемещение муфты какой-либо внешней силой не вызовет изменение частоты вращения вала.



Преобразуемые физические величины различают между собой как: *причина и следствие*. Физическая величина, которая является причиной изменения другой физической величины, называется *входной*, а физическая величина, которая является ее следствием, называется *выходной* (рис. 3.4).

Рисунок 3.4 Изображение звена на структурной схеме

Статической характеристикой звена называется зависимость между входной и выходной величинами в различных установившихся состояниях данного звена: $X_{\text{вых}}=f(X_{\text{вх}})$. Данное уравнение является уравнением статики или статической характеристикой звена.

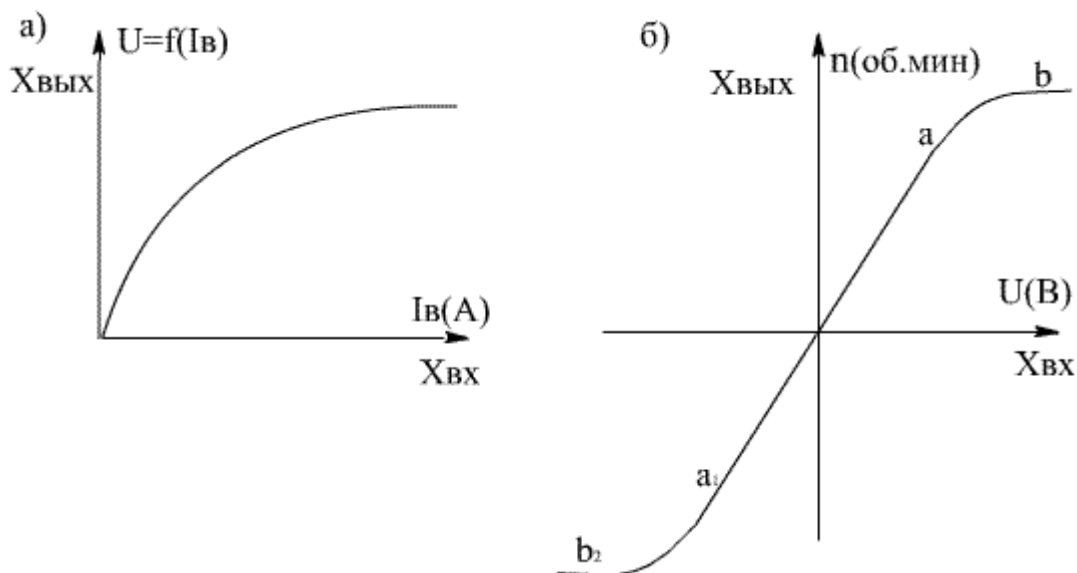


Рисунок 3.5 - Статическая характеристика звеньев САР

где а) Статическая характеристика генератора,
 б) Статическая характеристика генератора электродвигателя постоянного тока.

Если статическая характеристика звена описывается линейными функциями, то система называется *линейной*:

$$X_{\text{вых}}=a+KX_{\text{вх}},$$

где **a** – постоянная величина, имеющая размерность $X_{\text{вых}}$;

K - постоянная величина, имеющая размерность $DX_{\text{вых}}/DX_{\text{вх}}$.

Звено называется *нелинейным*, если его статическая характеристика выражается нелинейной функцией (рис. 3.6 а,б).

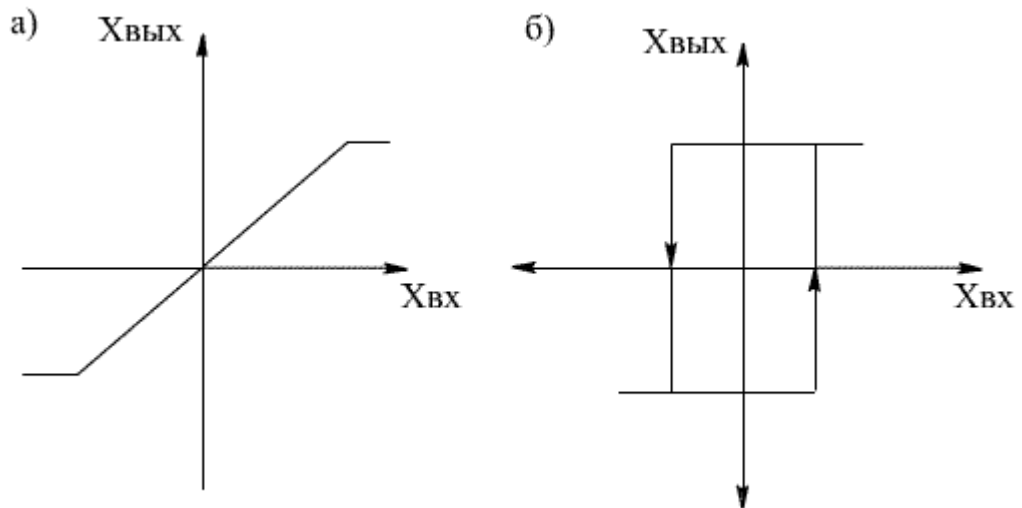


Рисунок 3.6 - Нелинейная статическая характеристика САР

Графическая зависимость, показывающая изменение во времени выходной величины Y звена, вследствие того, что входная величина X приобрела новые значения, называется *переходной* или *временной* характеристикой. Переходные характеристики определяются путем аналитического решения уравнения динамики звена, относительно выходной величины или экспериментально. Для определения переходных характеристик (рис. 3.7б) в качестве временных функций входной величины $X_{\text{вх}}$ используются стандартные единичные ступенчатые воздействия (рис.3.7а).

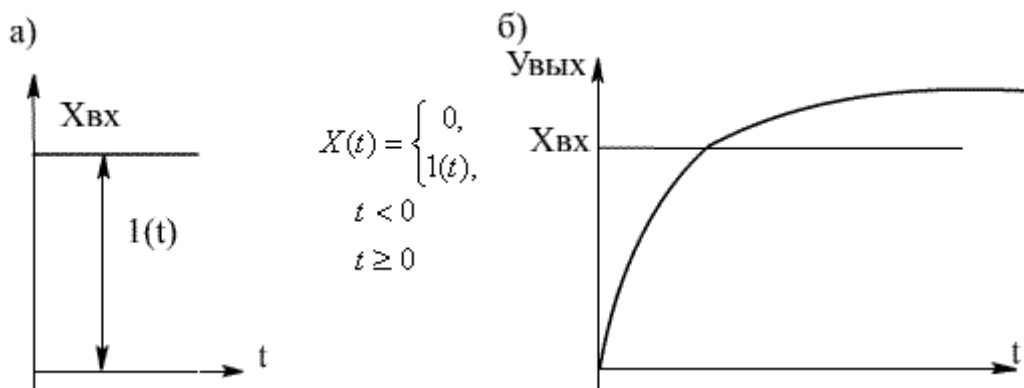


Рисунок 3.7 - Временная характеристика звеньев САР

- а) входное (единичное ступенчатое) воздействие;
 б) переходная характеристика

Изображение единичного скачка в операторной форме

$$X(p) = L\{1(t)\} = \frac{1}{p}, \quad Y(p) = W(p)X(p) = W(p) \frac{1}{p}$$

График переходной функции – кривая зависимости $h(t)$ от времени t – называют *переходной или разгонной характеристикой*:

$$Y(t) = h(t) = L^{-1}\left\{\frac{1}{p}W(p)\right\}$$

Другим видом временной характеристики звена является *импульсная характеристика*. Для получения импульсной переходной функции в вход звена подается единичное импульсное воздействие. Физически единичный импульс можно представить, как очень узкий импульс, ограничивающий

3.5 Элементарные (типовые) звенья и их характеристики

Типовым звеном САР называют ее элемент, обладающий определенными динамическими свойствами. Эти свойства определяются формой переходного процесса $Y_{\text{вых}}(t)$, при подаче на вход скачкообразного воздействия $X_{\text{вх}}$.

В зависимости от формы переходного процесса $Y_{\text{вых}}(t)$ при подаче на вход скачкообразного воздействия $X_{\text{вх}}(t)$ различают в основном шесть типов динамических звеньев линейных САР: усилительные, апериодические, колебательные, интегрирующие, дифференцирующие и звено с запаздыванием.

Усилительное звено (безинерционное)- это простейшее элементарное звено, которое образуется в случае передачи входного сигнала на выход без каких либо замедлений или ускорений во времени. Это звено называют еще пропорциональным, так как, выходная величина пропорциональна входной. Свойство элемента описывается уравнением $y(t) = k y^x(t)$, где K_y - коэффициент усиления усилительного звена.

Усилительное звено является безинерционным, в нем выходная величина мгновенно приобретает установившееся значение, усиливая (или

ослабляя) входную в K_y раз. В природе не существует идеальных усилительных звеньев – любое звено при передаче входного сигнала, вносит запаздывание. Передаточная функция усилительного звена имеет вид:

$$W_y(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = k_y.$$

Апериодическое звено (инерционное) - это звено, в котором связь между выходной и входной величинами описывается следующим образом:

$$T \frac{dX_{вых}}{dt} + X_{вых} = kX_{вх};$$

решение уравнения дает математическое описание переходного процесса:

$$y_{вых}(t) = kx_{вх} (1 - e^{-t/T}),$$

где T - постоянная времени (сек);

K - коэффициент усиления (передача) звена.

Передаточная функция имеет вид:

$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1}.$$

Апериодическое звено, называется также, *статическим звеном первого порядка*, так как при постоянном входном сигнале с течением времени устанавливается постоянная выходная величина. Звено называется еще инерционным, потому что в результате мгновенного изменения входного воздействия выходная величина изменяется не мгновенно, а с переменной скоростью, которая постепенно уменьшается до нуля.

Примером апериодического звена может служить **LR** или **RC** - цепочка, магнитный усилитель, термopара, электродвигатель и т.д.

Колебательное звено. Это звено состоит из тех элементов, которые обладают свойствами емкости и способом взаимно обмениваться веществами (или энергией) через сопротивления. В колебательном звене соотношение между выходной и входной величинами описывается линейным

дифференциальным уравнением второго порядка при коэффициенте затухания $z < 1$:

$$T^2 \frac{d^2 Y_{вых}}{dt^2} + 2\zeta T \frac{dY_{вых}}{dt} + Y_{вых} = kX_{ex}$$

Примерами колебательного звена может служить электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения, включаемый в холостую, в котором входной величиной является напряжение, а выходной – скорость вращения вала; **RLC** электрическая цепь, мембранный исполнительный механизм, поплавковый дифманометр.

Примером интегрирующего звена могут служить гидравлические двигатели, $n=f(U)$, электрический индукционный счетчик и др.

Интегрирующие звенья придают САР астатический характер. Поэтому они могут вводиться в исходную САР как корректирующие устройства, повышающие точность регулирования.

Дифференцирующее звено. Различают идеальное и реальное дифференциальное звено. Идеальным дифференцирующим звеном является динамическое типовое звено САР, математическое описание которого приводится к виду

$$Y_{вых}(t) = t \frac{dX_{ex}}{dt} \quad \text{или} \quad W(p) = \frac{Y_{вых}(p)}{X_{ex}(p)} = tp,$$

где t - постоянная времени звена. Такое звено можно представить в виде электрической цепи, где выходное сопротивление равно нулю.

3.6 Структурные схемы и передаточные функции САР

Структурной схемой в теории автоматического управления называют графическое изображение математической модели автоматической системы управления в виде соединений звеньев. Звено на структурной схеме условно

обозначают в виде прямоугольника с указанием входных и выходных величин, а также передаточной функции внутри его (иногда вместо передаточной функции указывают уравнение или характеристику). Структурную схему широко используют на практике при исследовании и проектировании автоматических систем управления, так как она дает наглядное представление о связях между звеньями, о прохождении и преобразовании сигналов в системе.

Любая линейная САУ может быть представлена как совокупность типовых динамических звеньев, соединенных *последовательно, параллельно, смешано, охваченных обратными связями* и т.д.

1) Передаточная функция последовательно соединенных звеньев:

При последовательном соединении выходная величина каждого предшествующего звена является входным воздействием последующего звена (рис.-3.19).

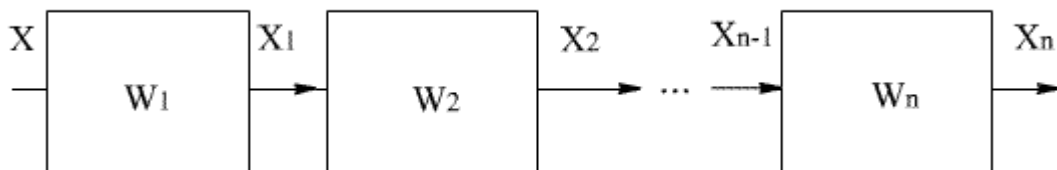


Рисунок 3.9 - Структурная схема последовательно соединенных звеньев

$$W_1(p) = \frac{x_1(p)}{x(p)}; W_2(p) = \frac{x_2(p)}{x_1(p)}; W_n(p) = \frac{x_n(p)}{x_{n-1}(p)}; W_{об}(p) = \frac{x_n(p)}{x(p)}$$

т.е.

$$W_{об}(p) = \frac{x_1(p)}{x(p)} * \frac{x_2(p)}{x_1(p)} * \dots * \frac{x_n(p)}{x_{n-1}(p)} = \frac{x_n(p)}{x(p)} = W_1(p) * W_2(p) * \dots * W_n(p)$$

Таким образом, передаточная функция последовательно соединенных звеньев равна произведению передаточных функций отдельных

звеньев:
$$W(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p) ; i=1, n.$$

2) Передаточная функция параллельно соединенных звеньев:

При параллельном соединении на вход всех звеньев подается один и тот же сигнал, а выходные величины складываются (рис. 3.20).

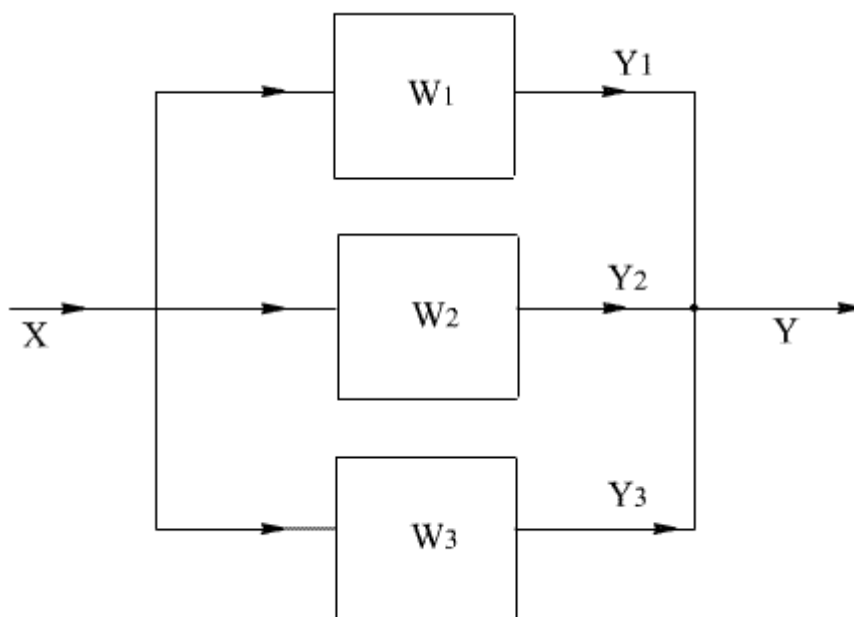


Рисунок 3.10 - Структурная схема параллельно соединенных звеньев

$$W_1(p) = \frac{y_1(p)}{x(p)}; W_2(p) = \frac{y_2(p)}{x(p)}; W_n(p) = \frac{y_n(p)}{x(p)} \text{ и}$$

$$W_{об}(p) = \frac{y_1(p)}{x(p)} + \frac{y_2(p)}{x(p)} + \dots + \frac{y_n(p)}{x(p)} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i(p)}{x(p)} = \sum_{i=1}^n W_i(p)$$

Таким образом, передаточная функция параллельно соединенных звеньев равна сумме передаточных функций, входящих в соединение.

3) Передаточная функция смешанно соединенных звеньев:

При смешанном соединении звеньев системы, передаточная функция последовательной и параллельной части системы определяется по отдельности, затем по произведению этих передаточных функций определяют общую передаточную функцию системы:

$$W_{об}(p) = W_{вх}(p) * W_3(p) * \dots * W_{вых}(p),$$

где

$$W_{\Sigma}(p) = \frac{y_1(p)}{x(p)} + \frac{y_2(p)}{x(p)} + \dots + \frac{y_n(p)}{x(p)} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i(p)}{x(p)} = \sum_{i=1}^n W_i(p)$$

передаточная

функция параллельной части системы.

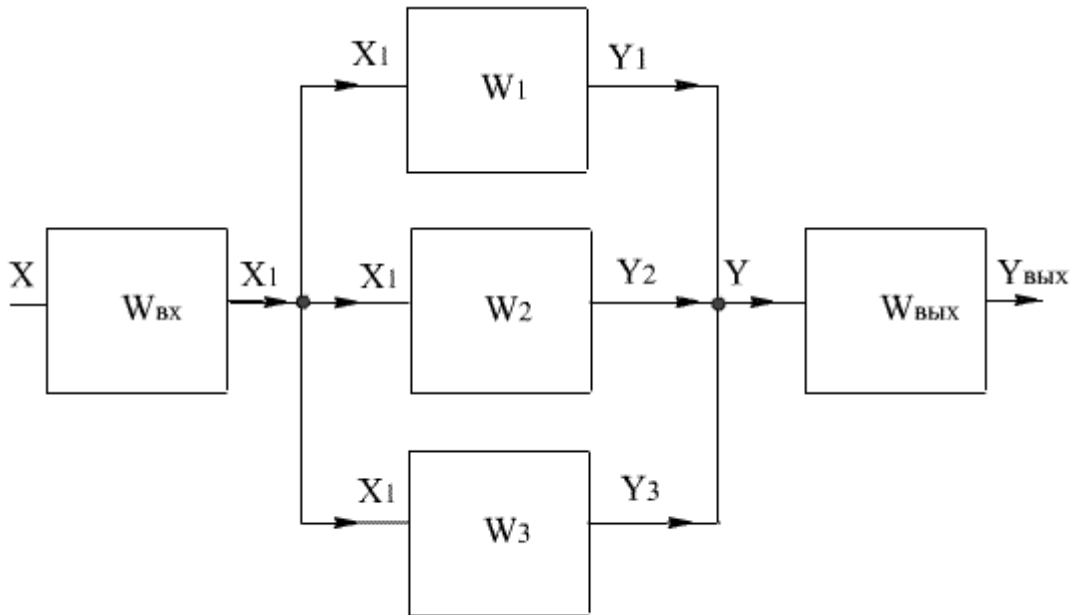


Рисунок 3. 11 - Структурная схема смешано соединенных звеньев

4) Передаточная функция звена, охваченного обратной связью.

Принято считать, что звено охвачено обратной связью, если его выходной сигнал через какое-либо другое звено подается на вход. Обратная связь может быть *отрицательной* ($Dy = y_0 - y_1$) или *положительной* ($Dy = y_0 + y_1$).

Если звено с передаточной функцией $W_1(P)$ охвачено звеном с передаточной функцией $W_2(P)$, то передаточная функция такого соединения

$W_3(P) = \frac{W_1(P)}{1 \pm W_1(P)W_2(P)}$ где, “+” соответствует случаю отрицательной связи, а “-” случаю положительной обратной связи; $W_p(P) = W_1(P) * W_1(P)$ – передаточная функция разомкнутой цепи.

Передаточная функции $W_3(P)$ замкнутой цепи с отрицательной (положительной) обратной связью – звена, охваченного отрицательной (положительной) обратной связью, - равна передаточной функции прямой

цепи, деленной на единицу плюс (минус) передаточная функция разомкнутой цепи.

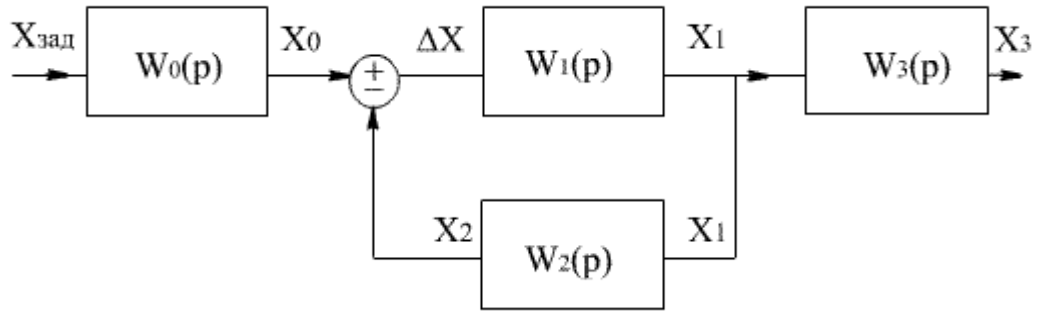


Рисунок 3.12 - Структурная схема звена охваченного обратной связью
 При отрицательной обратной связи $\Delta X = X_0 - X_2$, где $X_2 = X_1 * W_2(P)$.

$$X_1 = \Delta X * W_1(P) = W_1(P) * \{X_0 - X_1 * W_2(P)\};$$

$$X_1 = W_1(P) * X_0 - X_1 * W_2(P) * W_1(P);$$

$$X_1 + X_1 * W_2(P) * W_1(P) = W_1(P) * X_0;$$

$$X_1(1 + W_2(P) * W_1(P)) = W_1(P) * X_0;$$

$$\frac{X_1}{X_0} = \frac{W_1(P)}{1 + W_2(P) * W_1(P)}.$$

Передаточная функция системы выглядит следующим образом $W(P) =$

$$\frac{X_3}{X_{зад}} = \frac{W_0(P) * W_1(P) * W_3(P)}{1 + W_2(P) * W_1(P)} = \frac{W_{разом}(P)}{1 + W_{oc}(P) * W_{оке}(P)}$$

где, $W_{разом}(P)$ - передаточная функция разомкнутой САР; $W_{oc}(P)$ - передаточная функция обратной связи, $W_{оке}(P)$ - передаточная функция звена, охваченного обратной связью.

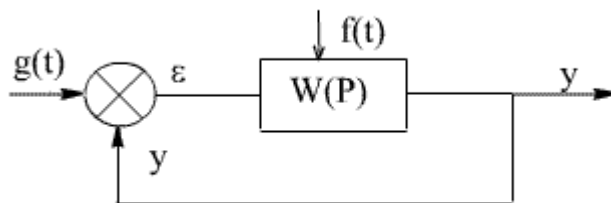


Рисунок 3.13 - Структурная схема звена с единичной обратной связью
 Передаточная функция замкнутой САР с единичной обратной связью

$$W_{зам}(P) = \frac{W(P)}{1 \pm W(P)}.$$

Из этой формулы вытекает выражение передаточной функции замкнутой системы через выражение передаточной функции разомкнутой системы:

$$W_{зам}(P) = \frac{W_{разом}(P)}{1 \pm W_{разом}(P)},$$

так как разомкнутая система преобразуется в замкнутую путем замыкания единичной отрицательной обратной связью.

4 УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ. КРИТЕРИЙ УСТОЙЧИВОСТИ

4.5 Постановка задачи исследования устойчивости.

4.6 Алгебраические критерии устойчивости.

4.7 Частотные критерии устойчивости. Устойчивость разомкнутых и замкнутых САУ.

4.8 Качество управления САУ.

4.1 Постановка задачи исследования устойчивости

Практическая пригодность САУ, определяется ее устойчивостью и приемлемым качеством процесса управления (регулирования). На любую САУ действуют различные внешние возмущения, которые могут нарушать ее нормальную работу. Правильно спроектированная система должна устойчиво работать при всех внешних возмущениях.

В простейшем случае, понятие *устойчивость* системы связана со способностью ее возвращения к исходному состоянию после кратковременного внешнего воздействия. Если система *неустойчивая*, она не возвращается к состоянию равновесия, из которого по каким-то причинам вышла.

Если шарик (рис. 4.1а), лежащий на дне чаши переместить на ее стенку и отпустить, то после нескольких колебаний он возвратится в исходное положение. Это пример *устойчивой* системы. Система называется *нейтральной*, если после снятия возмущающего воздействия она приходит в состояние равновесия, но не первоначальное, т.е. равновесие наступает при произвольном значении выходной координаты системы. Например, шарик, катящийся по горизонтальной плоскости (рис. 4.1б). Если под возмущающим воздействием отклонить шарик от равновесного положения и он никогда не возвращается в первоначальное положение, то такая система называется *неустойчивой* (рис.4.2в).

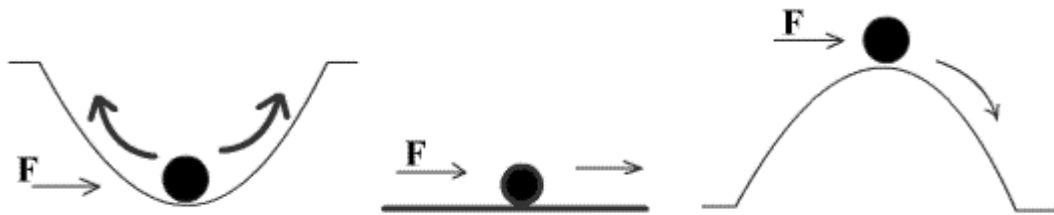


Рисунок 4.1 - Пример на устойчивости предмета

Рассмотрим процесс регулирования частоты вращения вала теплового двигателя (рис. 2.6). Статическая характеристика процесса регулирования этой системы представлена на рис. 4.2а. Система автоматического регулирования частоты вращения вала двигателя находится в установившемся режиме работы, соответственно в точке **A** статической характеристики системы. Нагрузке на валу $M_{н1}$ соответствует частота вращения n_1 . Допустим, в момент времени $t=t_1$ произошло скачкообразное увеличение нагрузки на валу до значения $M_{н2}$ (рис. 4.2б) которому соответствует новый установившийся режим **B** с установившимся значением частоты вращения вала $n=n_2$. Однако в силу инерционности подвижных частей системы переходу в установившийся режим **B** предшествует переходный процесс: $n(t)=n_{уст}+n_{пер}$, где $n_{уст}$ - частота вращения, соответствующая данному установившемуся режиму после окончания переходного процесса; $n_{пер}$ - переходная погрешность частоты (рис.4.2в).

Движение системы из одного установившегося режима в другой может казаться либо устойчивым, либо неустойчивым. Это можно выяснить путем исследования динамики процесса регулирования, т.е. определением закона изменения регулируемого параметра в функции времени при воздействии на систему возмущающих факторов.

Если $n_{пер}$ стремится к нулю хотя бы за неограниченно большой промежуток времени, то САУ (САР) считается устойчивой. Если же $n_{пер}$ не стремится к нулю с течением времени, то система считается неустойчивой.

Впервые строгое определение устойчивости было дано русским ученым А.М.Ляпуновым в 1892г.

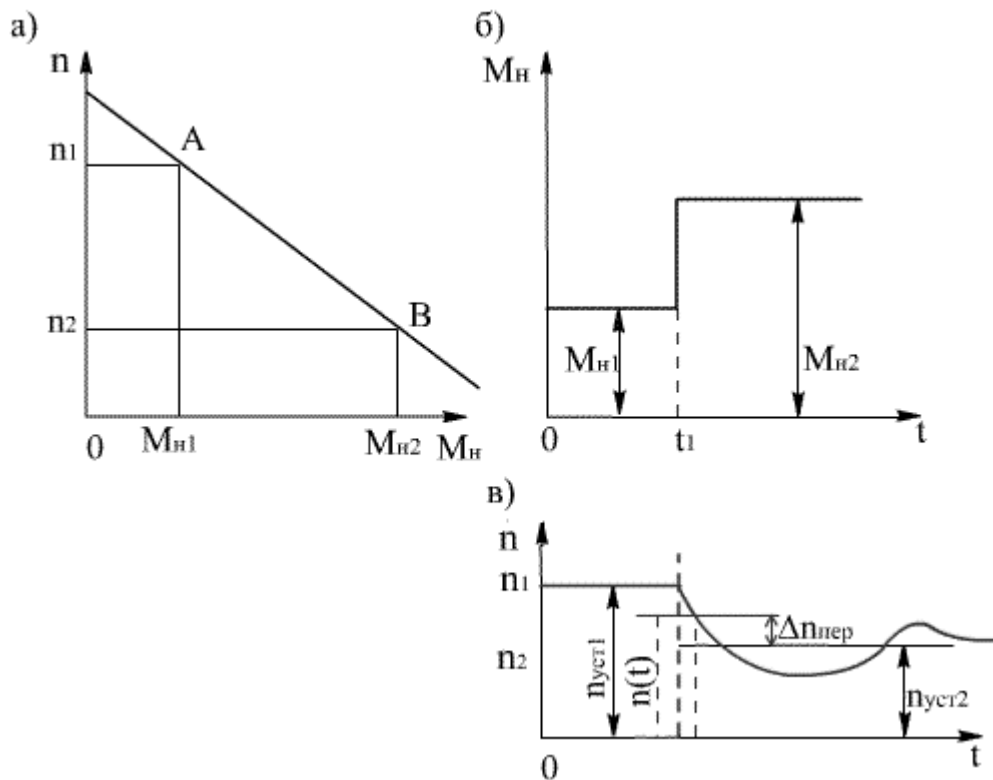


Рисунок 4.2 - Характеристика и графика процесса регулирования

Необходимым и достаточным условием устойчивости линейной системы автоматического регулирования является отрицательность вещественных частей всех корней ее характеристического уравнения.

Характеристическое уравнение может быть получено из передаточной функции замкнутой системы, связывающей любые ее вход и выход, путем приравнивания нулю знаменателя передаточной функции.

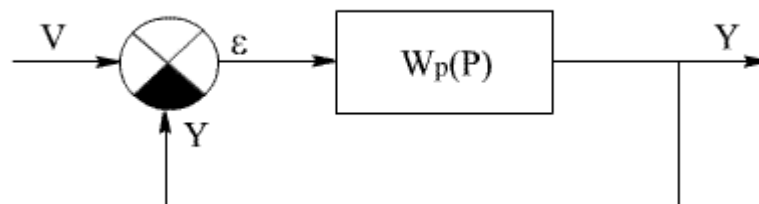


Рисунок 4.3 - Функциональная схема замкнутой системы

Если передаточная функция разомкнутой системы $W_p(P) = \frac{K(P)}{D(P)}$, где $K(P)$ и $D(P)$ полиномы степеней соответственно m и n ($m \geq n$), то передаточная функция замкнутой системы (рис. 4.3).

$$W_p(P) = \frac{Y(P)}{V(P)} = \frac{W_p(P)}{1+W_p(P)} = \frac{K(P)}{K(P)+D(P)}$$

Характеристическое уравнение замкнутой системы $K(P)+D(P)=0$ или $A(P)=a_n p^n+a_{n-1}p^{n-1}+...+a_0=0$. С увеличением порядка характеристического уравнения усложняется определение корней уравнения. В теории автоматического управления (ТАУ) пользуются условиями, которые позволяют судить о расположении корней в левой полуплоскости без нахождения их значений; эти условия называются *критериями устойчивости*. Существующие критерии устойчивости делятся на две группы: алгебраические и частотные критерии.

4.2 Алгебраические критерии устойчивости

Создание алгебраических критериев устойчивости связано с именами английского математика **Рауса** (1877г.) и швейцарского математика **Гурвица** (1895г.). Эти критерии связаны между собой и при анализе устойчивости приводят к одним и тем же алгебраическим неравенствам. Поэтому, их иногда объединяют под общим названием *критерия Рауса-Гурвица*.

Для определения устойчивости линейной САУ по *критерию Рауса* по характеристическому уравнению $A(P) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_0 = 0$ составляется таблица по форме представленной в табл 1.

Таблица 4.1 – Данные для определения устойчивости линейной САУ

b_{11}	b_{12}	b_{13}	-	-	b_{1e}
b_{21}	b_{22}	b_{23}	-	-	b_{2e}
b_{31}	b_{32}	b_{33}	-	-	b_{3e}
...
b_{r1}	b_{r2}	b_{r3}	-	-	b_{re}

где - b_{re} –элемент таблицы Рауса:

$b_{11}=a_0$; $b_{12}=a_2$; $b_{13}=a_4$ –и т.д. коэффициенты характеристического уравнения с четными индексами;

$b_{21}=a_1$; $b_{22}=a_3$; $b_{23}=a_5$ –и т.д. коэффициенты характеристического уравнения с нечетными индексами.

Элементы остальных строк таблицы определяются на основании общего выражения

$$b_{re} = \frac{b_{r-1,1}b_{r-2,e+1} - b_{r-2,1}b_{r-1,e+1}}{b_{r-1,1}}$$

По критерию устойчивости Рауса, исходя из принципа левых корней характеристического уравнения, для того чтобы линейная САУ была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы коэффициенты первого столбца таблицы Рауса имели один и тот же знак, т.е. при $b_{11}>0$ положительны, $b_{11}>0$; $b_{21}>0$; ...; $b_{r1}>0$.

Для определения устойчивости линейной САУ по критерию Гурвица из коэффициентов характеристического уравнения $A(P) = a_0p^n + a_1p^{n-1} + \dots + a_{n-1}p + a_0 = 0$ составляются определители Гурвица по форме:

$$\Delta_1 = a_1 > 0; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} > 0; \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} > 0;$$

По критериям Гурвица, для того чтобы САУ была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы все определители Гурвица имели знаки, одинаковые со знаком первого коэффициента характеристического уравнения a_0 , т.е. при $a_0>0$ были положительными.

$$\Delta_1 = a_1 > 0; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} > 0; \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} > 0;$$

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

Например, $a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0$,

$$a_0 > 0; \quad \Delta_1 = a_1 > 0; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_4 & a_2 \end{vmatrix} > 0$$

Критерий устойчивости Гурвица обычно применяют при $n > 4$

4.3 Частотные критерии устойчивости. Устойчивость разомкнутых и замкнутых САУ

Частотные критерии устойчивости позволяют судить об устойчивости САУ по виду их частотных характеристик. Эти критерии позволяют сравнительно легко исследовать устойчивость систем высокого порядка, а также имеют простую геометрическую интерпретацию и наглядность.

Критерий устойчивости **А.В. Михайлова (1938г.)** позволяет судить об устойчивости системы на основании рассмотрения некоторой кривой, называемой **кривой (годографом) Михайлова**.

Пусть дано характеристическое уравнение системы:

$$D(p) = a_n p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_0$$

Заменив p на $j\omega$ получим комплексный полином:

$$D(j\omega) = a_n (j\omega)^n + a_1 (j\omega)^{n-1} + \dots + a_0 = X(\omega) + jY(\omega),$$

где $X(\omega) = a_n - a_{n-2}(j\omega)^2 + a_{n-4}(j\omega)^4 - \dots$; $Y(\omega) = (a_{n-1} - a_{n-3}(j\omega)^2 + a_{n-5}(j\omega)^4 - \dots)$, называют соответственно вещественной и мнимой функциями Михайлова. При изменении частоты ω вектор $D(\omega)$, изменяясь по величине и направлению, будет описывать своим концом в комплексной плоскости некоторую кривую (АФЧХ), называемую *годографом Михайлова*.

По критерию Михайлова, для того чтобы система автоматического управления была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы вектор кривой Михайлова $D(j\omega)$ при изменении ω от 0 до ∞ повернулся, нигде не обращаясь в нуль, вокруг начала координат против часовой стрелки на угол $\pi n/2$, где n - порядок характеристического уравнения.

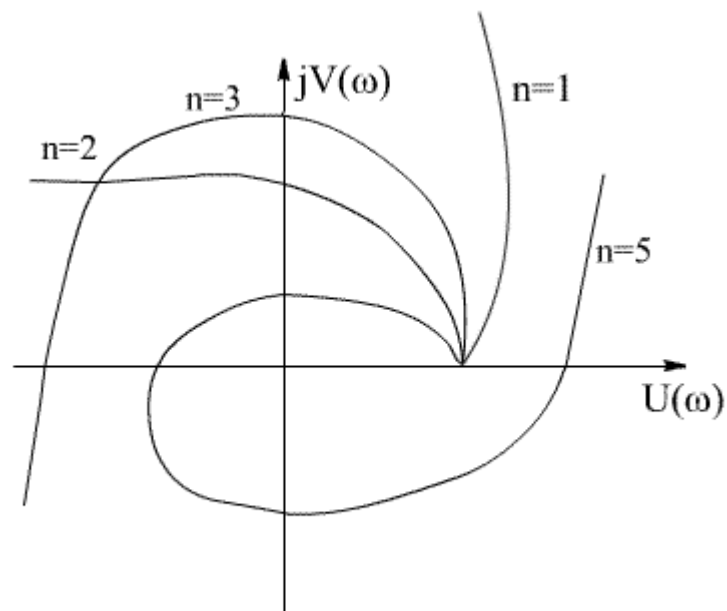


Рисунок 4.4 - Годограф Михайлова для устойчивых систем

Признаком неустойчивости системы является нарушение числа и последовательности пройденных кривой Михайлова квадрантов координатной плоскости, вследствие чего угол поворота вектора $D(j\omega)$ оказывается меньше, чем $\pi n/2$ (рис. 4.5).

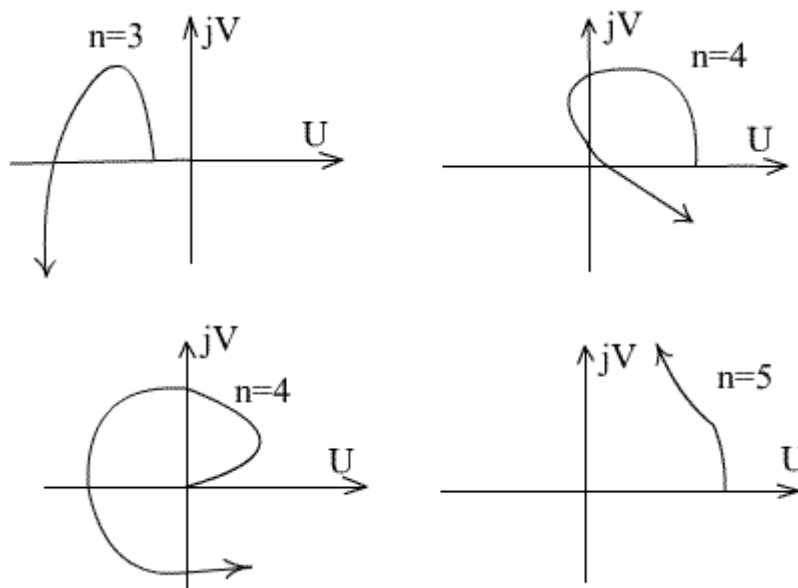


Рисунок 4.5 - Годограф Михайлова для неустойчивых систем

Критерий устойчивости **Г. Найквиста** (1932г.) позволяет судить об устойчивости замкнутой системы по виду АФЧХ разомкнутой системы.

Пусть, передаточная функция разомкнутой системы $W_p(P) = \frac{K(P)}{D(P)}$. Подставляя $P = j\omega$, получаем частотную передаточную функцию

разомкнутой системы: $W_p(j\omega) = \frac{K(j\omega)}{D(j\omega)} = U(P) + jV(P)$. Если изменять частоту ω от $-\infty$ до $+\infty$, то вектор $W_p(j\omega)$ будет меняться по величине и фазе. Кривую, описываемую концом вектора $W_p(j\omega)$ в комплексной плоскости, называют *амплитудно-фазовой характеристикой разомкнутой системы* (рис. 4.6).

Передаточная функция замкнутой САУ $W_3(P) = \frac{W(P)}{1+W(P)} = \frac{K(P)/D(P)}{1+K(P)/D(P)}$. В результате получим

$$W_3(P) = \frac{K(P)}{D(P) + K(P)},$$

где $D(P)+K(P)$ характеристический полином замкнутой системы.

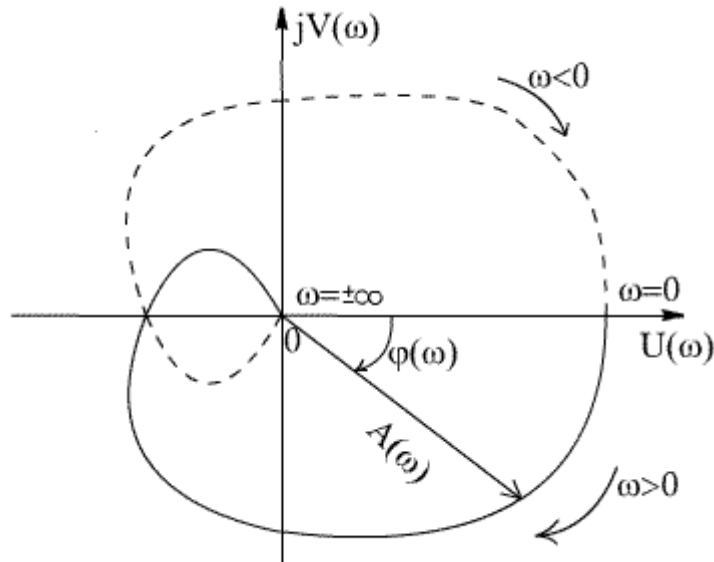


Рисунок 4.6 - АФХ разомкнутой системы

Характеристический полином разомкнутой и замкнутой систем связан следующими уравнениями:

$$\mathbf{F(P)} = \mathbf{1 + W_p(P)} = \mathbf{1 + \frac{K(P)}{D(P)} = \frac{D(P) + K(P)}{D(P)},}$$

где $\mathbf{D(P)}$ -характеристический полином разомкнутой системы. Если АФХ построить по $\mathbf{F(j\omega)}$, то критическая точка является началом координат $\mathbf{(0;j0)}$, если АФХ строятся по $\mathbf{W_p(j\omega)}$, то критическая точка является $\mathbf{(-1;j0)}$, поскольку $\mathbf{F(j\omega)}$ отличается от $\mathbf{W_p(j\omega)}$ на $\mathbf{+1}$.

А) Если разомкнутая САУ неустойчива то, для того чтобы замкнутая САУ была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы АФХ разомкнутой системы $\mathbf{W_p(j\omega)}$ при изменении частоты ω от 0 до ∞ охватывала точку $\mathbf{(-1;0)}$ в положительном направлении $\mathbf{L/2}$ раз, где \mathbf{L} -число правых корней характеристического уравнения разомкнутой системы.

На рис. 4.7а) показано АФХ $\mathbf{F(j\omega)}$, а на рис. 4.7б – АФХ $\mathbf{W_p(j\omega)}$, соответствующие устойчивой замкнутой системе, которая в разомкнутом состоянии была неустойчива и имела число правых корней $\mathbf{L=2}$.

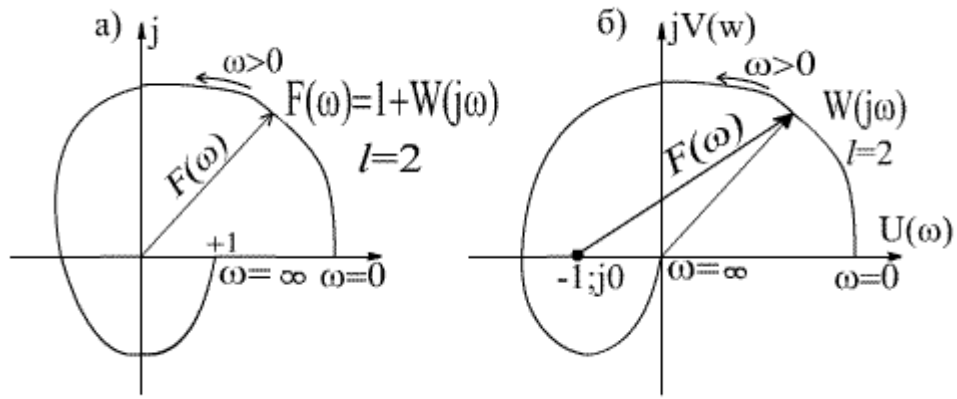


Рисунок 4.7 - АФХ замкнутой (а) и разомкнутой (б) системе

Б) Если разомкнутая САУ устойчива ($L=0$ правых корней нет), то замкнутая САУ будет устойчива, если АФХ разомкнутой системы $W_p(j\omega)$, не охватывает точку $(-1; j0)$.

Таким образом, для устойчивости замкнутой системы необходимо, чтобы АФХ замкнутой системе $F(j\omega)$ не охватывала начало координат (рис. 4.8а), а АФХ разомкнутой системе $W_p(j\omega)$ не охватывало точку с координатами $(-1; j0)$ (рис. 4.8б).

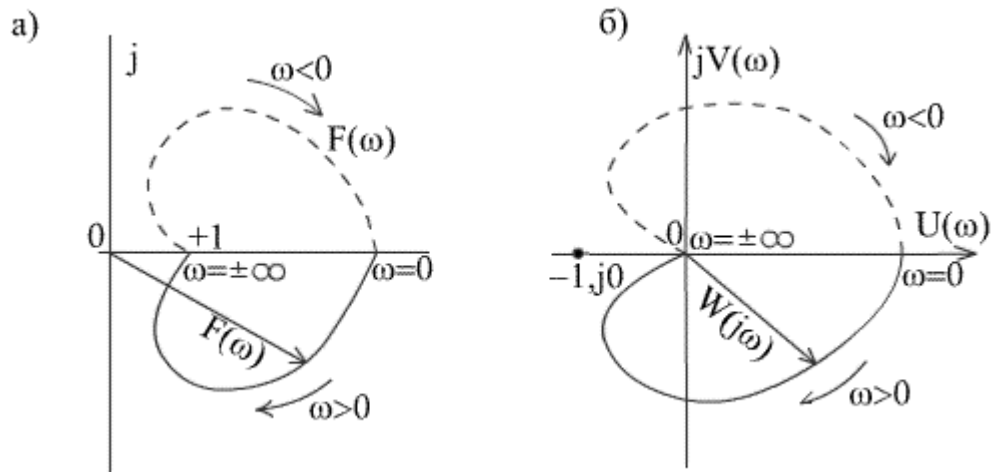


Рисунок 4.8 - АФХ замкнутой (а) и разомкнутой (б) системе

А также, когда разомкнутая система находится на границах устойчивости, для устойчивости замкнутой системы, АФХ разомкнутой системы должен не охватывать точку $(-1; j0)$.

4.4 Качество управления САУ

Устойчивость САУ – необходимое, но не достаточное свойство. Устойчивая система при отработке различных воздействий может оказаться недостаточно точной, переходные процессы управления в ней могут затухать медленно, с большими или малыми отклонениями регулируемого параметра от заданного значения. Все эти и другие факторы отражают так называемое *качество процесса управления* и требуют специального исследования, т.е. не менее важной является проблема качества процессов регулирования.

Под качеством процесса регулирования понимают способность автоматического регулятора поддерживать с достаточной точностью заданный закон изменения регулируемого параметра. Качество процесса регулирования тем выше, чем меньше отклонение регулируемого параметра от заданного значения и чем быстрее достигается заданный установившийся режим.

Наиболее распространенными критериями качества в автоматике являются: статическая и динамическая ошибки регулирования, время регулирования, степень колебательности, интегральные критерии.

Оценки качества регулирования, полученные на основе анализа графиков переходного процессов в САУ при типовых воздействиях, называются *прямыми* оценками. Оценки качества регулирования, базирующиеся на анализе различных промежуточных характеристик, например на анализе передаточной функции, называются *косвенными* оценками.

Из графика переходного процесса (рис. 4.9) легко определить некоторые критерии качества, а именно:

- ошибка, остающаяся по окончании переходного процесса перерегулирование;
- время регулирования;
- число колебаний регулируемой величины в заданное время;
- степень колебательности.

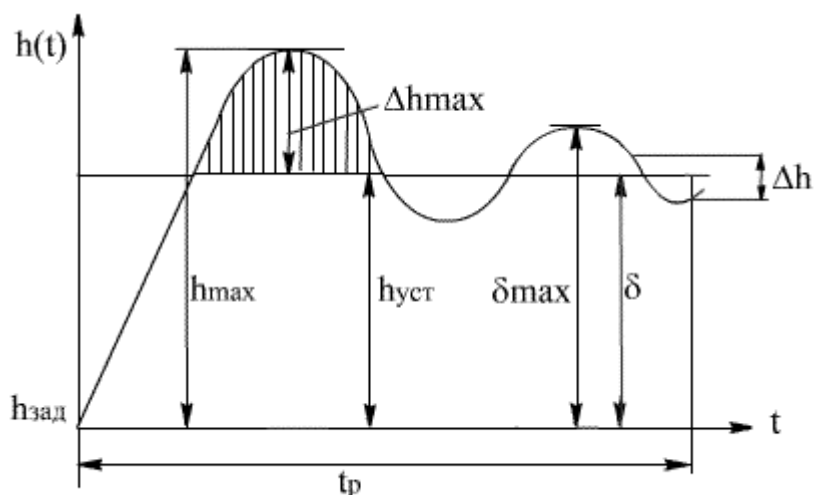


Рисунок 4.9 - Процесс регулирования с указанием показателей качества регулирования

1) Ошибка, остающаяся по окончании переходного процесса, т.е. ошибка в установившемся режиме работы, которая может состоять из двух составляющих.

Первая составляющая этой ошибки, обусловленная точностью действия отдельных звеньев, зависит от трения, люфтов, зазоров и т.д. Эта составляющая определяет зону нечувствительности САУ.

Следовательно, в установившихся режимах работы величина регулируемого параметра $h(t)$ не будет строго постоянной во времени.

Вторая составляющая рассматриваемой ошибки – максимальная допустимая статическая ошибка (неравномерность регулирования), которая зависит от величины нагрузки в статической системе и равна нулю в астатической.

Статическая ошибка равна разности между установившимся значением регулируемой величины $h_{уст}$ и ее заданным значением $h_{зад}$. Если статическая ошибка и максимальная допустимая статическая ошибка равны нулю, то регулирование и система являются астатическими.

2) Перерегулирование – максимальное отклонение регулируемой величины, которое не должно превышать максимального допустимого

значения. В данном случае фактическое значение регулируемого параметра $h(t)$ в переходном процессе превышает установившееся значение $h_{уст}$, т.е. в системе имеет место перерегулирование. Максимальная величина

$$h_{\max} = \frac{h_{\max} - h_{уст}}{h_{уст}} 100$$

(h_{\max} – максимальное значение регулируемого параметра).

Максимальные отклонения в переходном процессе регулируемой величины от ее установившегося значения также называют *динамическими ошибками* $\Delta h_{\max} = h_{\text{дин}}$.

3) **Время регулирования t_p** – это промежуток времени, по истечении которого абсолютная величина $|h(t) - h_{уст}|$ не превышает ширины зоны нечувствительности Δh .

Практически временем регулирования t_p – называют промежуток времени (от начала переходного процесса), в течение которого абсолютная величина переходной ошибки становится меньше допустимой (обычно она составляет 3-5% установившегося значения регулируемого параметра). Период времени от t_1 до t_2 и есть время регулирования. Время регулирования $t_p = t_2 - t_1$, или быстродействие САУ, зависит от вида, числа и характера включения звеньев, входящих в данную систему.

4) **Число колебаний регулируемой величины в заданное время**, которое не должно превышать определенного значения. В связи с этим в некоторых системах должен быть апериодический (монотонный) переходный процесс при минимальном времени протекания, в некоторых системах целесообразнее обеспечивать колебательный переходный процесс, не допуская перерегулирования.

5) **Степень колебательности** характеризует интенсивность затухания колебательного процесса, причем не всего переходного процесса, а наиболее медленно затухающей составляющей (рис.-4.10). Количественной оценкой

интенсивности затухания служит *степень затухания*, определяемая по

формуле:
$$\Psi = \frac{h_1 - h_3}{h_1} .$$

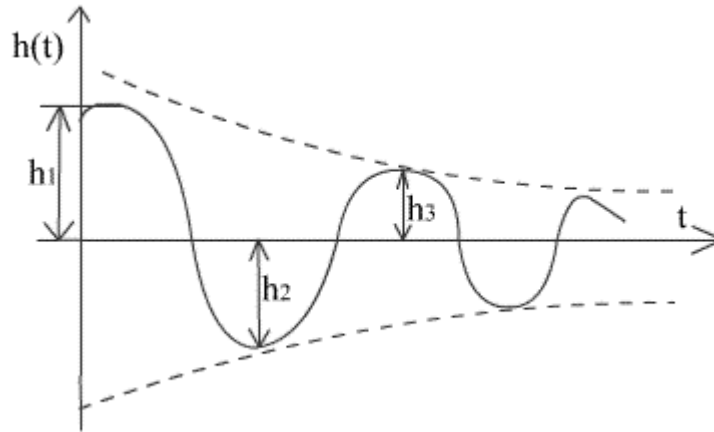


Рисунок 4.10 - График, характеризующий степень затухания колебательного процесса

Для достижения требуемого качества регулирования необходимо обеспечить статическую точность. Статическая ошибка может быть уменьшена путем увеличения общего коэффициента усиления регулятора. Повысить качество регулирования в частности можно путем изменения параметров регулируемого объекта или регулятора. Если параметры объекта не подлежат изменению, в таких случаях изменяют структурную схему регулятора путем введения дополнительных звеньев. Эти дополнительные устройства называются *корректирующими* устройствами.

Как отмечалось ранее, качество регулирования (управления) оценивается по форме кривой переходного процесса $h(t)$ при типовых воздействиях на систему. Для построения кривой переходного процесса требуется решение дифференциальных уравнений

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y)$$

с помощью методов численного интегрирования, как метод Эйлера, Рунге – Кутта и другие

Качество регулирования оценивается анализом графиков переходных процессов, а также анализом передаточной функции, которые называются косвенными оценками. Эти методы позволяют приблизительно определить некоторые показатели качества регулирования, например, степень устойчивости, время переходного процесса, перерегулирование без построения функции $h(t)$.

Методы *косвенной* оценки позволяют приблизительно определить некоторые показатели качества регулирования, например степень устойчивости, время переходного процесса, перерегулирование без построения функции $h(t)$. Широкое распространение в теории автоматического регулирования получили три косвенных метода оценки качества процесса регулирования: *корневой, интегральный, частотный*.

Корневые методы базируются на связи характера процесса в САР с характером распределения на комплексной плоскости корней дифференциального уравнения системы. Корневые методы наиболее удобны

для систем с передаточной функцией вида $W(p) = \frac{K}{H(p)}$, т.е. с передаточной функцией, не имеющей нулей (т.е. $K(p)=0$). В этом случае анализ распределения корней сводится к анализу распределения полюсов передаточной функции замкнутой системы (корней знаменателя передаточной функции, т.е. $H(p)=0$).

При использовании *интегральных* методов оценками качества служат определенные интегралы по времени от некоторой функции координат системы, вычисленные без решения дифференциальных уравнений. При этом оценки выбираются так, чтобы они, с одной стороны, наиболее просто выражались через параметры САР, а с другой стороны, характеризовали определенные показатели качества регулирования.

Интегральные методы удобны для сравнительной оценки близких по свойствам систем.

Частотные методы базируются на связи между характером переходных процессов в САР и формой вещественной частотной характеристики–функции $\mathbf{P}(t)$.

5 СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

5.1 Назначение автоматического контроля.

5.2 Погрешности измерений.

5.3 Первичные и вторичные приборы систем автоматического контроля.

5.4 Местный и дистанционный контроль. Роль и назначение систем телемеханики.

5.1 Назначение автоматического контроля

Контролем называется процесс получения информации о состоянии объекта управления. В результате автоматизации функции контроля создаются системы автоматического контроля, которые обеспечивают анализ большого количества контролируемых параметров технологического процесса.

Совокупность устройств, с помощью которых выполняются операции автоматического контроля, называется *системой автоматического контроля* (САК). Основными функциями САК являются восприятие контролируемых параметров с помощью датчиков, реализация заданных требований к контролируемому объекту (норм или значений уставок), сопоставление параметров с нормами, формирования суждения о состоянии объекта контроля и выдача результатов контроля.

САК классифицируют по следующим признакам:

- 1) числу точек контроля (*одноточечные и многоточечные*);
- 2) характеру контролируемых параметров (*специализированные и универсальные САК*);
- 3) точности измерения параметров;
- 4) быстродействию;
- 5) способу выбора точек контроля (система с обегаяющим (шаговым) контролем и произвольным контролем);

- 6) расстоянию от объекта до системы контроля (сосредоточенные, дистанционного контроля и телемеханические);
- 7) видам обрабатываемых сигналов (аналоговые, дискретные и цифровые САК);
- 8) наличие встроенных микропроцессорных средств и т.п.

Основу измерений составляет Международная система физических величин (SI или СИ). Например, электрическими единицами системы СИ является: А - Ампер (сила электрического тока); Гц - Герц (частота); Вт – Ватт (мощность: поток энергии); Кл - Кулон (количество электричества, электрический заряд); В - Вольт (электрический потенциал, напряжение, ЭДС); Ф- Фарад (электрическая емкость); Ом –Ом (электрическое сопротивление).

Всеми вопросами, связанными с измерениями, занимается специальная наука – *метрология*. *Метрология – это наука об измерениях физических величин, методах и средствах обеспечения их единства, способах достижения необходимой точности.*

Задачами метрологии являются определение единиц физических величин и их системы, разработка методов и средств измерения физических величин, методов оценки точности измерений, обеспечения единства измерений, установки эталонов и образцовых средств измерения, передачи параметров образцовых средств рабочим средствам измерений.

Измерением называют определение числового значения физической величины с использованием специальных технических средств.

Измерительный прибор – средство измерения и отображения измерительной информации в форме, доступной для восприятия пользователем или техническими средствами обработки результатов измерений. Измерительные приборы могут быть:

-*аналоговые*, показания которых являются непрерывной функцией измеряемой величины (например, термометр);

-*цифровые*, автоматически вырабатывающие дискретные сигналы, представленные в цифровой форме (например, часы-табло);

-*показывающие*, допускающие только отсчитывание показаний с помощью отсчетных устройств(например шкалы и стрелки);

-*регистрирующие*, в которых измеряемые значения величины фиксируются на специальном записывающем устройстве (например, диаграмная бумага, магнитная лента, микропроцессорное устройство и др.);

-*интегрирующие*, дающие интегральное значение измеряемой величины (например, электросчетчик, спидометр и др.);

-*суммирующие*, показания которых есть сумма двух или нескольких величин, подводимых к прибору (например, ваттметр, измеряющий сумму мощностей нескольких электрических величин);

-*измерительные преобразователи*, или *датчики*, вырабатывающие сигналы измерительной информации в форме, удобной для передачи по каналам связи (например, термопара).

Измерить какую-либо физическую величину – значит сравнить ее с другой однородной величиной (мерой), принятой за единицу измерения. Основное уравнение измерения имеет вид:

$$N=qC,$$

где N-измеряемая величина;

C – единица измерения;

q– числовое значение измеряемой величины.

Измерения могут быть *прямыми*, *косвенными*, *совокупными* и *совместными*.

При *прямых* измерениях измеряемая величина определяется непосредственно из опытных данных по показаниям приборов.

При *косвенных* измерениях измеряемая величина определяется на основании известной зависимости между нею и величинами, значения которых получены в результате прямых измерений (например, определение

плотности тела по его массе и геометрическим размерам, площади прямоугольника по произведению двух прилегающих сторон и т.д.).

При *совокупных* измерениях числовые значения измеряемой величины определяются в результате решения ряда уравнений, полученных из совокупности прямых измерений одной или нескольких однородных величин, например определение температурного коэффициента электрического сопротивления

$$\alpha = \frac{r_{100} - r_0}{100 * r_0},$$

где r_0 и r_{100} – сопротивление материала соответственно при 0°C и 100°C .

Совместные измерения предусматривают одновременное измерение двух или нескольких неоднородных величин, которые позволяют определить искомую величину.

5.2 Погрешности измерений

Качество измерений, а так же передача информации характеризуется размером допущенных погрешностей.

Погрешность – оценка отклонения результата измерения от истинного значения измеряемой величины. В практике измерений принято выделять *абсолютную* и *относительную* погрешность.

Абсолютная погрешность измерения Δx равна разности между результатом измерения x_n и истинным значением измеряемой величины x :

$$\Delta x = x_n - x$$

Относительная погрешность измерения σ представляет собой отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины:

$$\sigma = \frac{\Delta x}{x} 100.$$

В измерительной технике используется также понятие *приведенной погрешности*:

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_k},$$

где x_k – постоянная величина разности конечных значений пределов измерения.

Важной характеристикой измерительных приборов систем автоматики является *класс точности*. Класс точности определяется на основании приведенной погрешности. Класс точности средств измерений является обобщенной характеристикой, определяемой пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами средств измерения. Классы точности измерительных приборов устанавливаются ГОСТом и указываются на их шкалах цифрами в кружочек. У приборов с определенным классом точности основная приведенная погрешность в рабочем диапазоне шкалы в процентах не должна превышать значения, соответствующего классу точности, выбранному из ряда чисел $\{1*10^n; 1,5*10^n; 2*10^n; 2,5*10^n; 4*10^n; 5*10^n; 6*10^n; \text{здесь } n=1;0;-1;-2;-3; \dots\}$

Чувствительностью прибора (**S**) к измеряемой величине x называется производная от перемещения указателя a по измеряемой величине x :

$$S = \frac{da}{dx} = F(x).$$

Это выражение характеризует чувствительность прибора в данной точке шкалы. Если чувствительность не зависит от измеряемой величины, то

ее можно определить как $\frac{a}{x}$.

Величина, обратная чувствительности, $C = \frac{1}{S}$ называется ценой деления прибора. Она равна числу единиц измеряемой величины, приходящихся на одно деление шкалы.

5.3 Первичные и вторичные приборы систем автоматического контроля

Измерительный прибор наиболее наглядно можно изобразить в виде функциональной схемы (рис. 5.1).

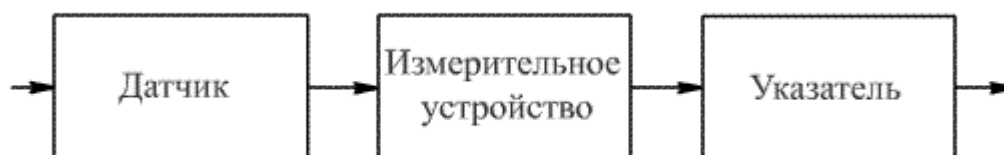


Рисунок 5.1 - Простейшая функциональная схема измерительного прибора

Датчик прибора для измерения той или иной величины представляет собой конструктивную совокупность нескольких измерительных преобразователей, размещаемых непосредственно у объекта измерения.

Используя дистанционную передачу, остальную часть измерительной аппаратуры (измерительные цепи, усилитель, источник питания т.д.) называемую *измерительным устройством*, выполняют в виде самостоятельного конструктивного узла, который может быть размещен в более благоприятных условиях. Требования к последней части измерительного прибора, т.е. к его *указателю*, отличаются от указанных выше и определяются удобством использования полученной информации.

В САК датчик называют первичным прибором. Он соединяется линией связи с вторичным прибором, объединяющим *измерительное устройство и указатель*.

На рис. 5.2 приведена принципиальная схема автоматического моста. Здесь, датчиком является магазин сопротивлений, измерительным устройством – мост, указателем- гальванометр.

По принципу действия датчики (первичные преобразователи) применяемые в электрических САК, можно разделить на две группы:

- Параметрические (термосопротивление, фотосопротивление и др.);
- Генераторные (термопара).

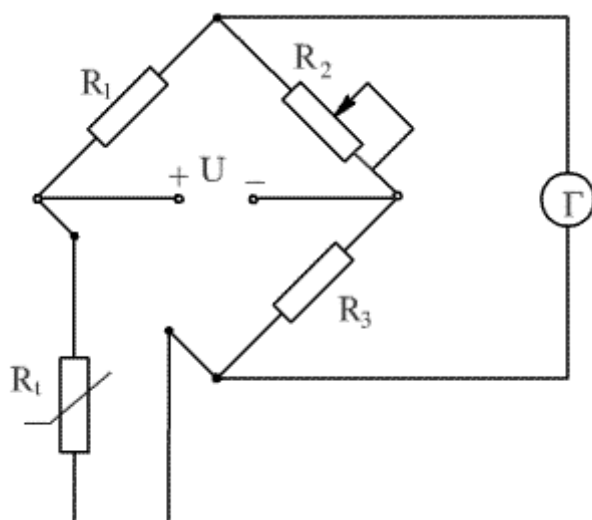


Рисунок 5.2 - Мостовая схема измерения температуры
 где R_1 и R_2 плечи моста, R_t -сопротивление датчика, U - напряжение источника питания, Γ - измерительный прибор (гальванометр)

В параметрических датчиках контролируемая величина преобразуется в параметры электрической цепи: сопротивление, индуктивность, емкость и др. В генераторных датчиках различные виды энергии непосредственно преобразуется в электрическую. По виду измеряемых величин датчики подразделяются на следующие: датчики температуры, датчики влажности, датчики уровня, датчики давления, датчики расхода и т.д.

5.4 Местный и дистанционный контроль. Роль и назначение систем телемеханики

В зависимости от назначения САК подразделяются на системы *местного, дистанционного и телеизмерительного контроля.*

В тех случаях, когда для удобства обслуживающего персонала измерительные приборы устанавливаются на самих объектах контроля («по месту»). Значение контролируемой величины считывается около самого объекта, с помощью показывающих, регистрирующих или иных приборов. При установке приборов «по месту» следует учитывать, в каких условиях протекает работа самого объекта контроля: имеет ли место вибрация, температура окружения, атмосферное давление, влажность воздуха и т.д.

Обычно технологические объекты являются многомерными: одновременно требуется контролировать несколько параметров объекта (например, расход воздуха и топлива, температура и давление пара в паровых котлах). Большое число приборов приводит к затруднению наблюдения параметров по месту. Поэтому большое число измерительных приборов группируется и размещается на щитах и пультах. Такая система централизованного контроля, которая позволяет вести контроль объекта на расстоянии и называется дистанционным контролем. Дистанционная САК состоит из трех основных частей: датчика (первичного преобразователя), вторичного прибора (показывающего, регистрирующего, сигнализации и др.) и канала связи.

Иногда расстояния между объектами и диспетчерским пунктом могут достигать десятков и более километров. В подобных случаях для дистанционного автоматического контроля требуются специальные средства передачи информации – средства телемеханики.

Телемеханика - дисциплина охватывающая теорию и практику устройств передачи информации и управления на расстоянии.

Устройства телемеханики применяемые в технологических объектах выполняют следующие функции:

1) *Телеизмерение* – передачу на расстояние значений величин, характеризующих режим работы контролируемых установок.

2) *Телеуправление* – передачу на расстояние импульсов управления, воздействующих на исполнительные механизмы управляемых установок.

3) *Телесигнализация* – передачу на расстояние сигналов о состоянии контролируемых объектов.

Телеизмерение– осуществляется с помощью двух систем – ближнего (до 15км) и дальнего (до сотен км.) действия. В системах ближнего действия, основанных на методе интенсивности, измеряемая величина преобразуется в значение силы тока или напряжения, подаваемое по каналам связи. В системах дальнего действия измеряемая величина передаётся с помощью электрических импульсов постоянного тока или изменяющейся частоты переменного тока.

Телеуправление – позволяет с помощью передаваемых импульсов воздействовать на исполнительные механизмы управляемых объектов. Средства телеуправления используют для пуска и остановки на расстоянии (из диспетчерского пункта) насосных агрегатов, регулирования степени открытия задвижек, включения и отключения вентиляторов и др. ТУ в аварийных условиях позволяет диспетчеру быстро производить необходимые переключения для локализации аварии.

Телесигнализация – используется для автоматической передачи сигналов о состоянии определяющих параметров теплоэнергетических объектов, насосных агрегатов, задвижек, фильтров и других агрегатов котельных установок. С помощью средств ТС на мнемонической схеме системы (на щите диспетчерского пульта) непрерывно указывается состояние элементов оборудования системы, а также любое изменение положения регулирующего органа или изменение параметров, как в процессе нормальной работы так и в предаварийных и аварийных ситуациях.

Важнейшее значение в телемеханике имеют следующие понятия.

Канал связи (КС), с помощью которого осуществляется передача сигналов на расстояния. Элементами КС являются: кабель, провод, усилители, коммутаторы, фильтры и др. КС должен обеспечивать наименьшее искажение передаваемых сигналов. По одной *линии связи* может быть создано несколько каналов связи для независимой передачи нескольких сообщений.

Сигнал- материальный носитель информации. Существует много методов создания сигналов в системах телемеханики, цель которых – уменьшить искажения, возникающие из-за помех и изменения параметров канала связи.

Помехоустойчивость – способность системы осуществлять передачу сигналов при наличии помех. Система считается достаточно помехоустойчивой, если расхождения между отправленным и полученным сигналом не превышают заданной величины.

Важное значение имеют точность, быстродействие, пропускная способность и надежность систем телемеханики.

Функциональная схема телемеханической системы на примере системы телеизмерения приведена на рис. 5.3:

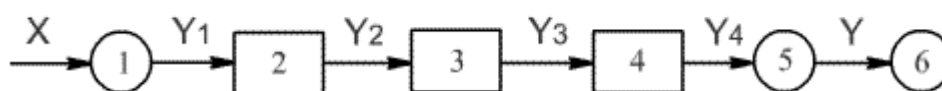


Рисунок 5.3 - Функциональная схема телеизмерения

Контролируемая величина X измеряется датчиком 1 и преобразуется в однозначно связанную с X вспомогательную величину Y_1 , называемую *первичным сигналом*. Кодировочное устройство 2 шифрует первичный сигнал, делая его отличным от других возможных сигналов Y_2 . Зашифрованный сигнал поступает в передающее устройство 3, которое преобразует телеизмерительный сигнал в линейный (Y_3), т.е. в сигнал, более удобный для

передачи по линии связи. В приёмном устройстве 4 линейный сигнал демодулируется, т.е. преобразуется в сигнал телеизмерения Y_4 , поступающий в декодирующее устройство 5, которое расшифровывает сигнал, преобразуя его в выходной, воздействующий на индикаторы контролируемых параметров 6, фиксирующих или регистрирующих их значения.

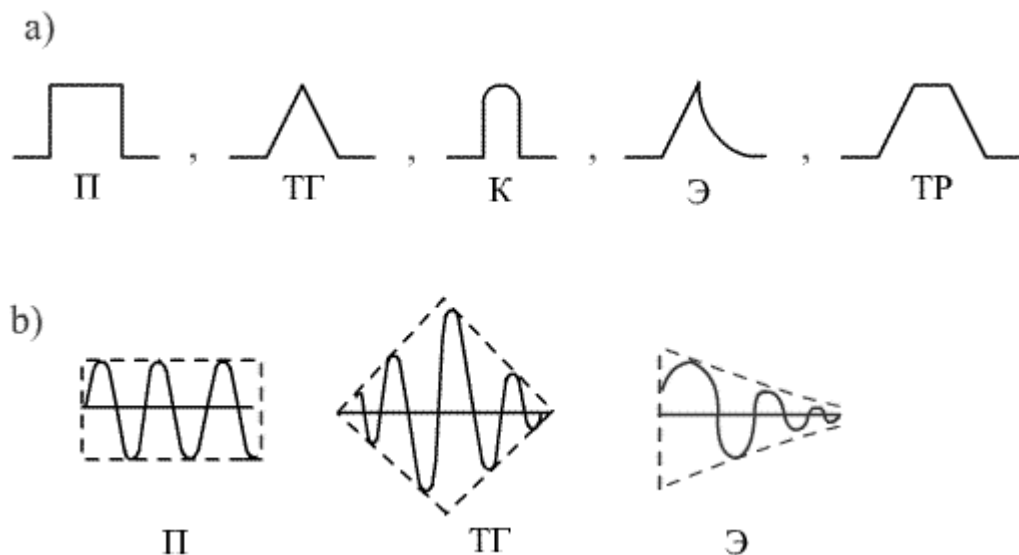


Рисунок 5.4 - Формы импульсов а) видеоимпульсы; б) радиоимпульсы; где П-прямоугольный; ТГ-треугольный; К-колокольный; Э-экспоненциальный; ТР-трапецеидальный

Для образования телемеханического сигнала используются электромагнитные колебания в виде переменного тока или импульсов. Импульсы постоянного тока или напряжения называют видеоимпульсами (рис. 5.4а) в отличие от радиоимпульсов или импульсов переменного тока, которые образуются при заполнении импульсов постоянного тока высокочастотными колебаниями (рис. 5.4б).

При использовании гармонического колебания получаем непрерывный сигнал, при подаче информации с помощью импульсов – дискретный. Дискретные сигналы в меньшей степени подвержены искажениям в процессе передачи.

В телемеханике для формирования сигналов применяется *кодирование*. Кодирование – это преобразование сообщения в дискретный сигнал в виде

кодовых комбинаций (двоичные – бинарные (0,1), десятичные (0...9), шестнадцатиричные (0...9,A,B,C,D,E,F) и др.).

Кодированный телемеханический сигнал должен быть преобразован с целью придания ему некоторых физических свойств, необходимых для передачи по линии связи. Одним из методов такого преобразования является *модуляция*.

Модуляция – это процесс изменения параметра переносчика информации в соответствии с передаваемым сообщением. В качестве переносчика информации используется либо высокочастотные гармонические колебания, либо непрерывная последовательность импульсов.

В зависимости от модулируемого параметра различают амплитудную (АМ), частотную (ЧМ) и фазную (ФМ) модуляцию.

Серия импульсов характеризуется рядом параметров: амплитудой импульсов, длительностью импульсов, положением импульсов во времени, числом импульсов и т.д. В зависимости от того, какой параметр изменяется под воздействием сообщения при осуществлении импульсной модуляции, можно получить амплитудно-импульсную (АИМ), широтно-импульсную (ШИМ), фазно-импульсную (ФИМ), частотно-импульсную (ЧИМ), кодоимпульсную (КИМ) и другие виды модуляции.

В системах ближнего действия для передачи сигналов на расстояния до 15 км применяется АМ. В системах дальнего действия используются методы импульсной и частотной передачи сигнала.

В системах телеуправления (ТУ) передача большого количества сигналов осуществляется по значительно меньшему числу линий связи. Системы ТУ обычно снабжаются обратной сигнализацией, осуществляемой по той же линии связи и подтверждающей выполнение объектами посылаемых им приказов, а также элементами, защищающими управляемые объекты от выполнения так называемых ложных, случайных приказов. Такие системы называются системами телеуправления и телесигнализации (ТУ-ТС).

По способу соединения передающих и приёмных устройств системы телеуправления делятся на многоканальные и одноканальные (малоканальные). В многопроводных системах ТУ несколько различных сигналов посылаются по нескольким линиям связи одновременно. В малопроводных системах ТУ сигналы посылаются последовательно по времени.

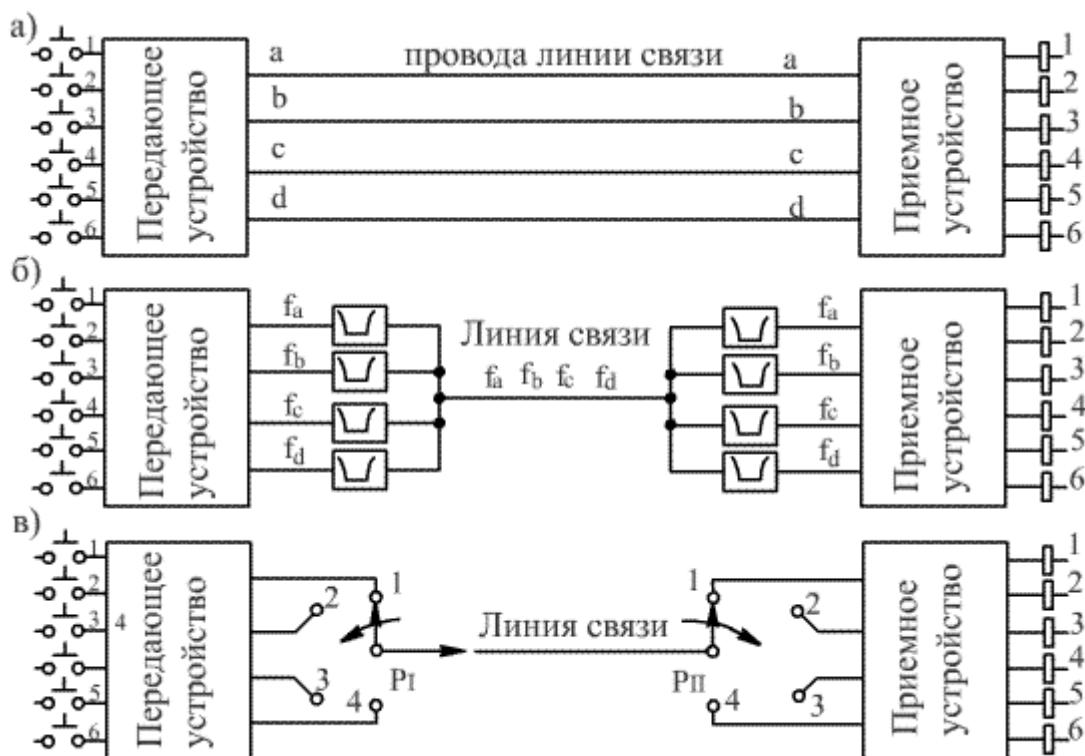


Рисунок 5.5 - Принципиальные схемы устройств телеуправления где а) - многопроводное устройство с разделением сигналов по электрическим цепям; б) и в) – малопроводные устройства с частотным временным разделением сигналов

Существуют следующие устройства ТУ по виду раздельной передачи сигналов (рис. 5.5):

- устройства ТУ со схемным разделением сигналов, или многопроводные устройства;
- устройства с частотным разделением сигналов;
- устройства с временным разделением сигналов.

6 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИГНАЛИЗАТОРЫ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ

6.1 Сигнализаторы.

6.2 Сигнализаторы температуры.

6.3 Сигнализаторы давления.

6.1 Сигнализаторы

Технологическими сигнализаторами называют такие элементы автоматики, которые предназначены для позиционного регулирования (включения, выключения) и сигнализации предельных значений контролируемых параметров.

Отличительной особенностью сигнализаторов является отсутствие измерительных шкал. Сигнализаторы в большинстве случаев имеют регулируемый диапазон срабатывания, позволяющий использовать их в определенном интервале рабочих пределов.

Сигнализаторы широко используются в цепях автоматического контроля простых и сложных технологических процессов. Например, сигнализаторы температуры, давления воды и масла, реле протока воды используют как элементы автоматической защиты при работе двигателей, компрессоров и преобразователей.

При нарушении контролируемых параметров сигнализаторы отключают работающее оборудование и включают сигнализацию нарушения параметров.

Сигнализаторы подразделяются на следующие основные типы: сигнализаторы температуры, сигнализаторы давления, сигнализаторы расхода, потока, скорости и т.п.

6.2 Сигнализаторы температуры

По принципу действия сигнализаторы температуры делятся на ртутные, манометрические, биметаллические, дилатометрические и термисторные.

Ртутные бесшкальные сигнализаторы температуры по устройству подобны ртутным стеклянным термометрам и имеют впаянные в капилляр электрические контакты, которые замыкаются ртутью при достижении заданной температуры (рис. 6.1). Термоконтакты типа ТК применяются в диапазоне температур от -5 до $+300^{\circ}\text{C}$. Допустимая погрешность датчиков не превышает в зависимости от рабочего диапазона температур $\pm 2-5^{\circ}\text{C}$.

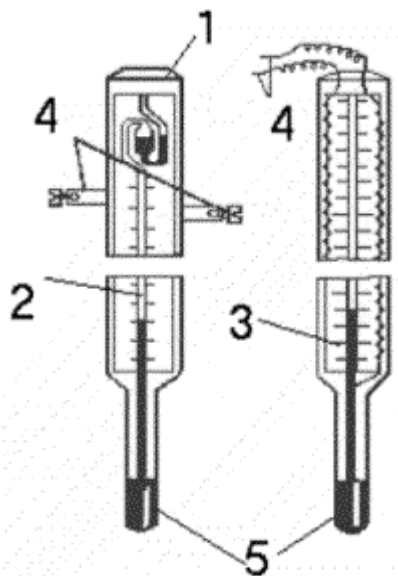


Рисунок. 6.1 - Ртутные стеклянные термометры:
1-корпус; 2-капилляр; 3-шкала; 4-контакты; 5-расширитель

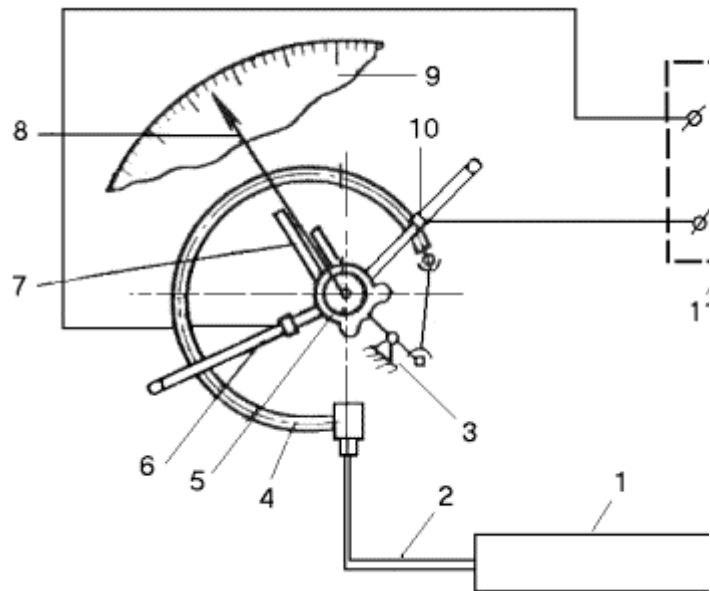


Рисунок 6.2. - Схема манометрического термометра ТПГ-СК:
1-термобалон; 2-капилляр; 3-сектор; 4-датчик (манометрическая трубка); 5-трубка; 6,10-установочные контакты; 7-поводок; 8-стрелка; 9-шкала; 11-блок зажимов

Манометрические сигнализаторы используют для автоматического контроля температуры жидкостей и газов. На рисунке приведен термометр

типа ТПГ-СК (рис.6.2). В качестве наполнителя термосистемы применяют фреон –12, 22 и другие низкокипящие жидкости. Дистанционные двухдиапазонные терморегуляторы типа ТР-1, ТДК и ТДД работают в интервале от –30 до 50°С. На рис. 6.3 представлен общий вид регулятора типа ТР-1.

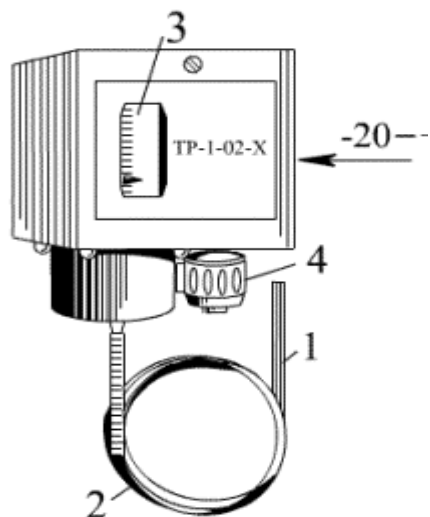


Рисунок 6.3 - Терморегулятор типа ТР-1:
1-термобалон; 2-капилляр; 3-шкала; 4-выводы регулятора

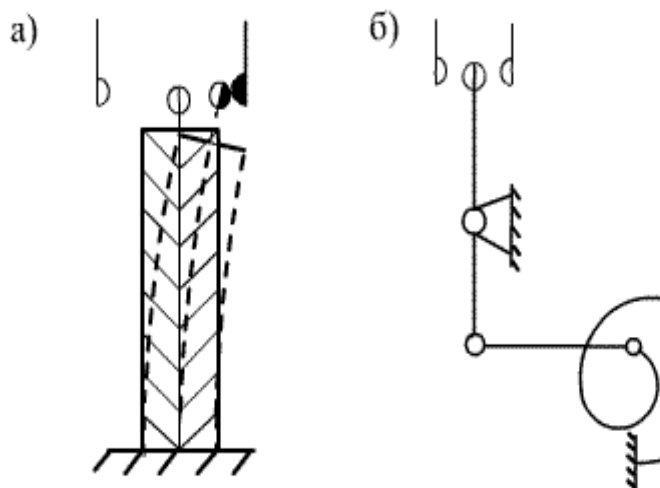


Рисунок 6.4 - Схемы биметаллических сигнализаторов:
а- с плоским элементом; б – со спиральным элементом.

Биметаллические сигнализаторы в зависимости от типа и модификации используют в пределах –30 до +250°С. В качестве чувствительных элементов сигнализаторов применяются сплав из двух металлов (биметалл), имеющих различные коэффициенты линейного расширения. Две тонкие металлические пластинки (рис. 6.4а) жестко соединяется между собой по всему периметру (спаяны, сварены, склепаны и т.п.).

При повышении температуры измеряемой среды в пластине биметалла из-за указанных коэффициентов возникает деформирующее усилие (изгиб), пластина изгибается и замыкает или размыкает закрепленный на ней электрический контакт. Величина деформации зависит от температуры. Например, если температура окружающей среды повысится, то изгиб

элемента произойдет в сторону пластины с малым температурным коэффициентом. Чтобы увеличить деформацию элемента с изменением

температуры, т.е. повысить его чувствительность, ему придают форму спирали (рис. 6.4б). Основные типы биметаллических сигнализаторов: РБ-1; РБ-3; РБ-7; ТР-4; ДТКМ.

Дилатометрические сигнализаторы типа ТРДЭ и РТ-200 работают на принципе изменения линейных размеров датчиков от температуры нагрева. Сигнализатор ТРДЭ имеет четыре модификации: ТРДЭ-101; ТРДЭ-201; ТРДЭ-301 и ТРДЭ-801 с диапазонами регулируемых температур соответственно 0°C до $+40^{\circ}\text{C}$; -30°C до $+40^{\circ}\text{C}$; $+30^{\circ}\text{C}$ до $+100^{\circ}\text{C}$ и 0°C до $+250^{\circ}\text{C}$.

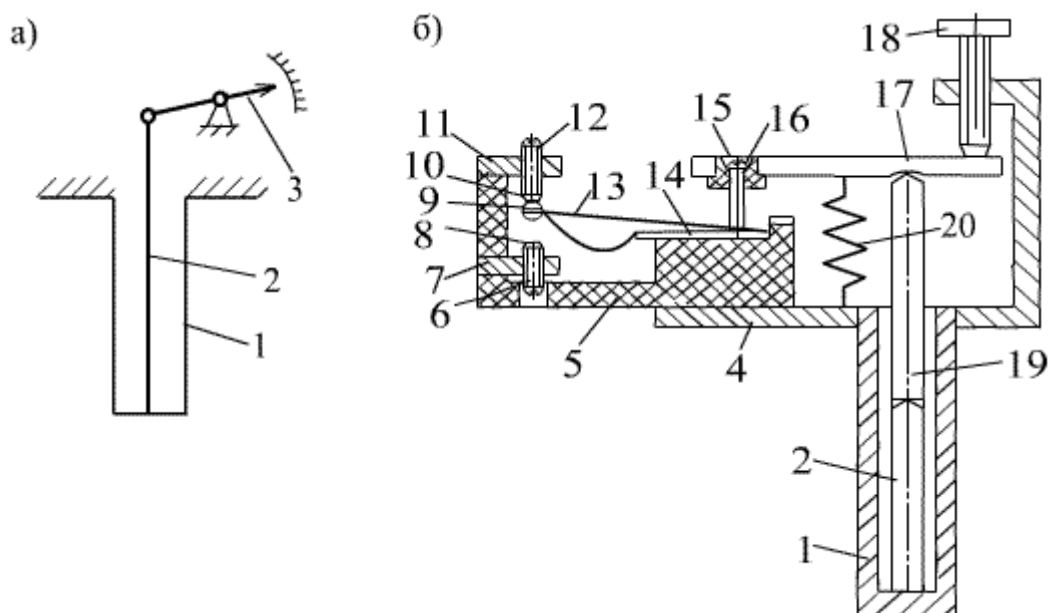


Рисунок 6.5 - Схема дилатометрического термометра (а) и дилатометрический сигнализатор температуры ТРДЭ (б)

где 1-трубка, 2-стержень, 3-устройство для отсчета, 4-плата, 5-колодка, 6, 12-винты, 7,11,14-пластины, 8,9,10- контакты, 13-пружина, 15-толкатель, 16-изолятор, 17-рычаг, 18-винт регулировки, 19-компенсационный стержень, 20-пружина.

Принцип действия дилатометрического сигнализатора типа ТРДЭ следующий (рис. 6.5). Латунная трубка 1 имеет большой коэффициент

линейного расширения, чем кварцевый стержень 2, поэтому при изменении температуры контролируемой среды длина трубки 1 изменится на большую величину, чем длина стержня 2. В результате этого изменится положение рычага 17 (по схеме дилатометрического термометра изменится положение устройства отсчета 3), он переместит перекидную пружину 13 с подвижным электрическим контактом 9 в сторону замыкания или размыкания контактов. Перекидная пружина 13 настроена так, что при незначительном перемещении стержня 2 толкатель 15 при понижении температуры переводит пружину 13 в положение, соответствующее замыканию контактов 9, 10, а при повышении температуры – замыканию контактов 8, 9. Винтом 18 сигнализатор настраивают на определенную температуру.

Термисторные сигнализаторы являются более современными элементами автоматической защиты технологического оборудования по температурному режиму, имеющие такие преимущества, как высокая надежность и малый габарит.

В качестве чувствительного элемента в таких сигнализаторах применяют термосопротивления - термисторы – типов ММТ, ДВС и ДАС, у которых при повышении температуры электрическое сопротивление уменьшается. Основными типами термисторных сигнализаторов являются полупроводниковые регуляторы температуры ПТР и АТВ-229

Диапазон регулируемых температур регуляторов ПТР в зависимости от модификации прибора составляет -30 до $+100$ °С. Область контролируемых температур регулятора АТВ-229 составляет $+24$ до $+131$ °С.

Регулятор АТВ-229 широко применяется для температурной защиты подшипников, вращающихся механизмов и обмоток электрических машин (рис.6.6). Регулятор АТВ –229 имеет десять термодатчиков типа ТДП и температурное реле РТ-230у, которое включено последовательно. Если температура контролируемой среды не достигла заданной величины, то сопротивление термистора велико и поэтому ток в цепи мал для срабатывания реле Р. При достижении заданной температуры сопротивление

датчика резко уменьшается, ток в цепи увеличивается и происходит срабатывание реле Р, которое своими контактами 1-2 включает световую или звуковую сигнализацию, а при необходимости отключает защищаемый объект.

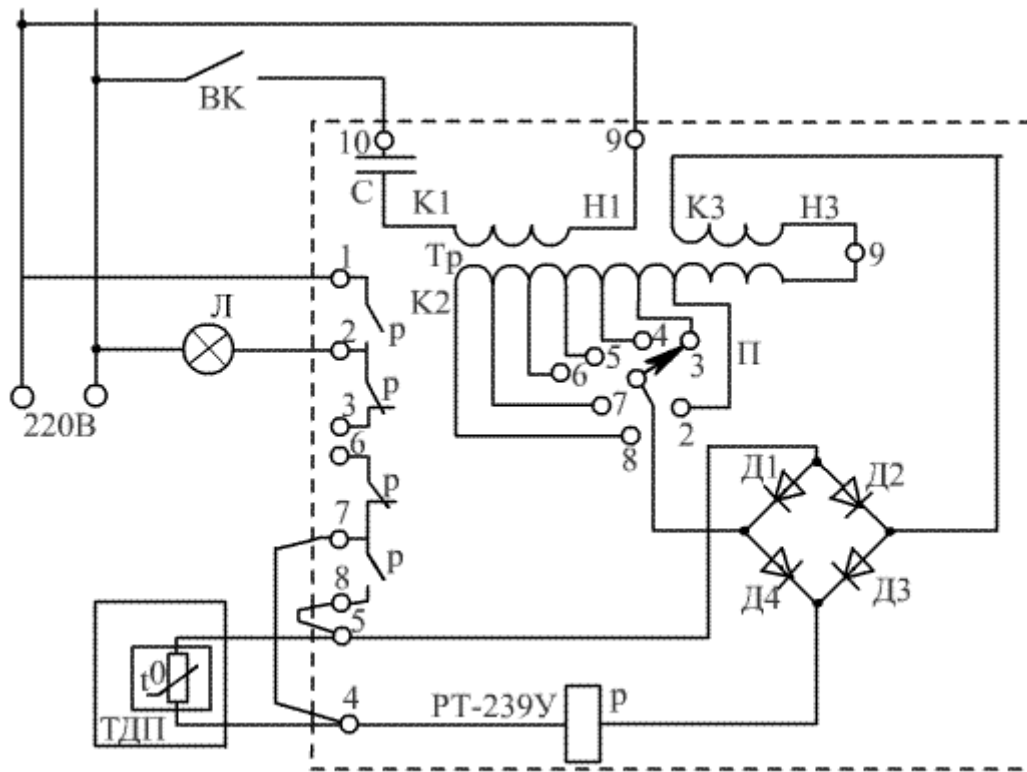


Рисунок 6.6 -Электрическая схема сигнализатора температуры АТВ-229. где ТДП - датчик температуры, ВК - переключатель, Р - реле, Д1-Д4 диоды, Л-Лампа сигнализации

Контакты 7-8 реле Р защищают термистор от большого тока срабатывания (закорачивают его сопротивление). Переключатель П служит для переключения задания по температуре срабатывания через каждые 10 °С.

Полупроводниковые терморегуляторы типов ПТР-2, ПТР-3, ПТР-П предназначены для регулирования и сигнализации температуры газообразных и жидких сред.

Общий вид прибора и его электрическая схема показан на рис. 6.7

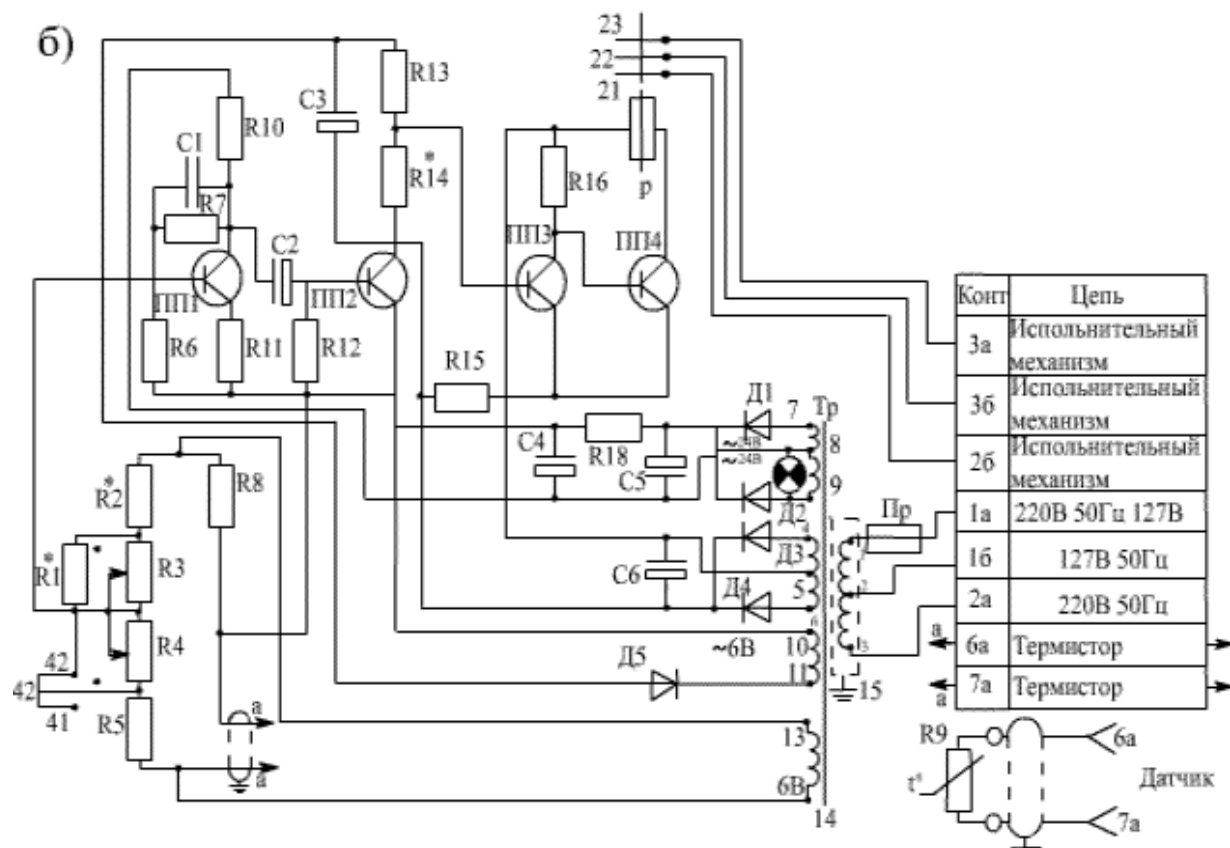
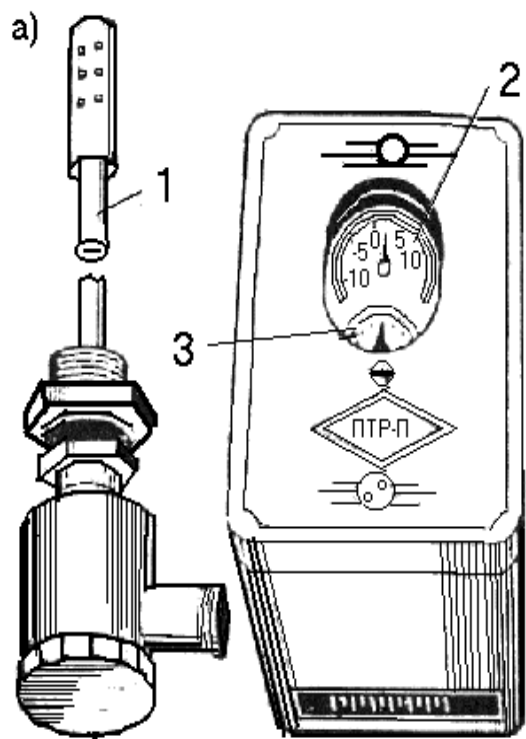


Рисунок 6.7 - Регулятор температуры типа ПТР

а) общий вид; 1-датчик; 2 - шкала задания температуры;

3 – шкала дифференциала температуры; б) электрическая схема.

Датчик прибора (термистор R9) включается в одно из плеч измерительного моста переменного тока, образованного сопротивлениями R1, R2, R3, R4, R5, R8.

При отклонении температуры объекта от заданного значения изменяется сопротивление датчика, мост разбалансируется и на выходе его возникает сигнал, пропорциональный величине отклонения температуры, а фаза сигнала определяется знаком указанного отклонения температуры (“больше заданной” или “меньше заданной”).

6.3 Сигнализаторы давления

Давление – величина, характеризующая интенсивность сил, действующих на какую-нибудь часть поверхности тела по направлениям, перпендикулярным этой поверхности.

По роду измеряемой величины приборы делятся на:

манометры – для измерения избыточного давления;

вакуумметры – для измерения вакуума (разрежения);

мановакуумметры – для измерения избыточного давления и вакуума;

напоромеры – для измерения небольших избыточных давлений (не более $3,9 \cdot 10^4$ Па);

тягомеры – для измерения небольших разрежений (не более $3,94 \cdot 10^4$ Па);

тягонапоромеры – для измерения и тяги, и напора;

дифференциальные манометры – для измерения разности двух давлений;

барометры – для измерения атмосферного (барометрического) давления.

Для защиты от высокого давления, компрессоры, паровой котел и сосуд высокого давления используют автоматическую защиту, позволяющую производить «сброс» предельного давления или остановку предаварийного оборудования. Для этой цели используются сигнализаторы давления, которое по типу чувствительного элемента подразделяются на четыре основных типа: **пружинные, поршневые, мембранные, сильфонные.**

Пружинные и поршневые сигнализаторы используют при давлении 2,5 -60 МПА (25-600 кгс/см²); **сильфонные и мембранные** при 0,02 - 0,25 МПА (0,2 - 2,5кгс/см²);).

Электроконтактный манометр типа ЭКМ по принципу действия и устройству подобен обычному манометру с одновитковой пружиной. Сигнальное устройство прибора (рис. 6.8) имеет два установочных контакта: минимальный (нижний) и максимальный (верхний), которые замыкаются с подвижным контактом, установленным соосно с измерительной стрелкой прибора. Установочные контакты с помощью штифта, расположенного на лицевой части прибора, могут перемещаться на соответствующее задание.

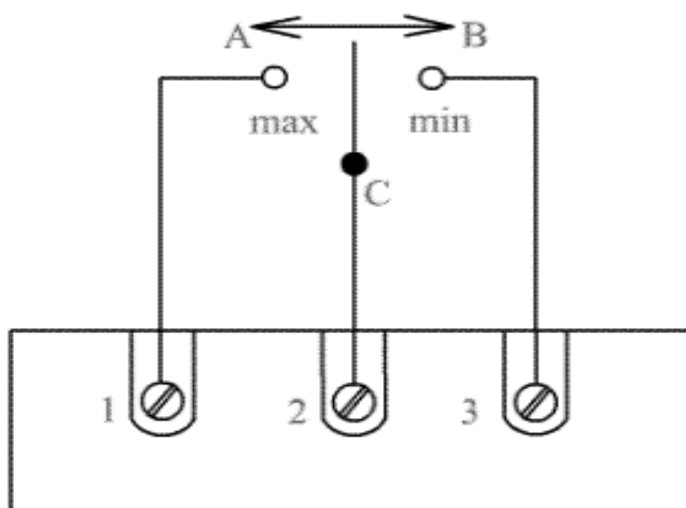


Рисунок 6.8 - Электрическое контактное устройство манометров

где 1-контакт максимального давления; 2-общий контакт; 3-контакт минимального давления

В мембранных сигнализаторах давления типов ДТ, ДН и СПДМ в качестве чувствительных элементов используется эластичная мембрана, выполненная из прорезиненной ткани. Плоская мембрана 2, сигнализатора давления типа ДН (рис. 6.9а), связана со штоком 1, который при изменении контролируемого давления, поступающего через штуцер 4 в полость датчика

3, замыкает или размыкает контакты микропереключателя 6, установленного на корпусе сигнализатора. Настройка диапазонов срабатывания производится с помощью противодействующей пружины 5.

Сильфонные сигнализаторы давления типов РД, ДД имеют большую чувствительность по сравнению с вышеописанными типами сигнализаторов, так как чувствительными элементами таких сигнализаторов являются сильфоны. Приборы типа ДД (датчик давления), состоят из трех унифицированных узлов - чувствительного элемента, пружинного задатчика и переключающего устройства (рис. 6.9б). При повышении давления контролируемой среды, поступающего через штуцер 5, сильфон 4 деформируется, преодолевает усилие противодействующей пружины 2 задатчика и толкателем 3 переключает микропереключатель 1.

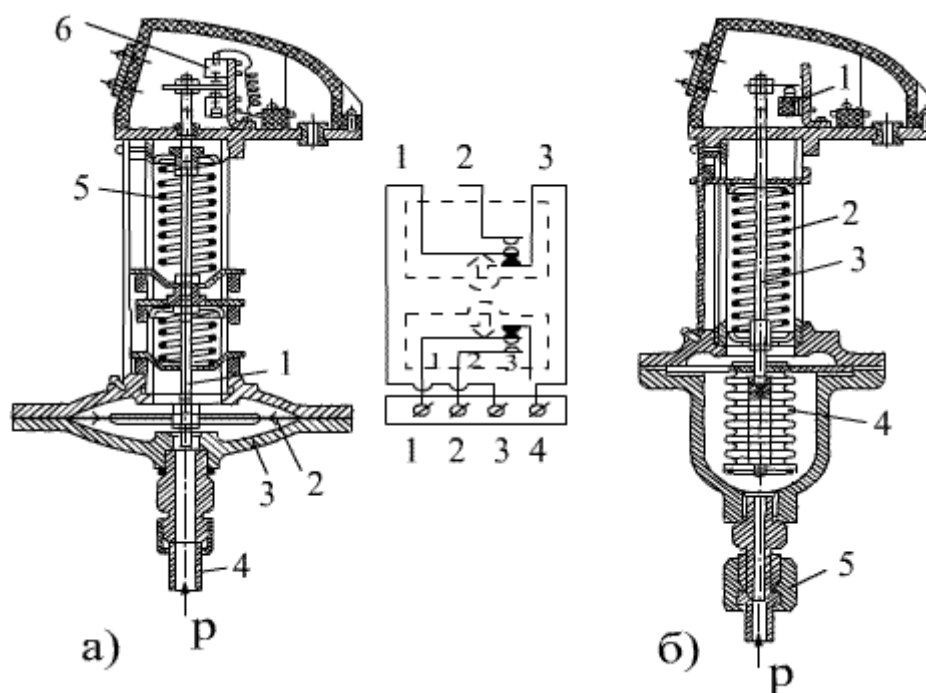


Рисунок 6.9 - Сигнализатор давления

где а - типа ДД: 1- шток; 2 - мембрана; 3 - полость датчика; 4 - штуцер; 5 - пружины; 6 - микропереключатель; б - типа РД: 1- микропереключатель; 2- пружины задатчика; 3 - толкатель; 4 - сильфон; 5 – штуцер.

Сигнализаторы давлений типов ДН, ДТ, РД, ЭКМ просты и надежны в эксплуатации, поэтому они широко применяются в защите технологического оборудования. На рис. 6.10 представлено **реле давления**. Реле давления предназначено для контроля и сигнализации давлений в технологических установках. Чувствительным элементом прибора является сильфон 2. Кроме механизма настройки давления срабатывания реле имеет механизм настройки дифференциала. Принцип действия прибора основан на уравнивании силы давления, действующей на сильфон 2, силой упругих деформаций регулировочной пружины 14.

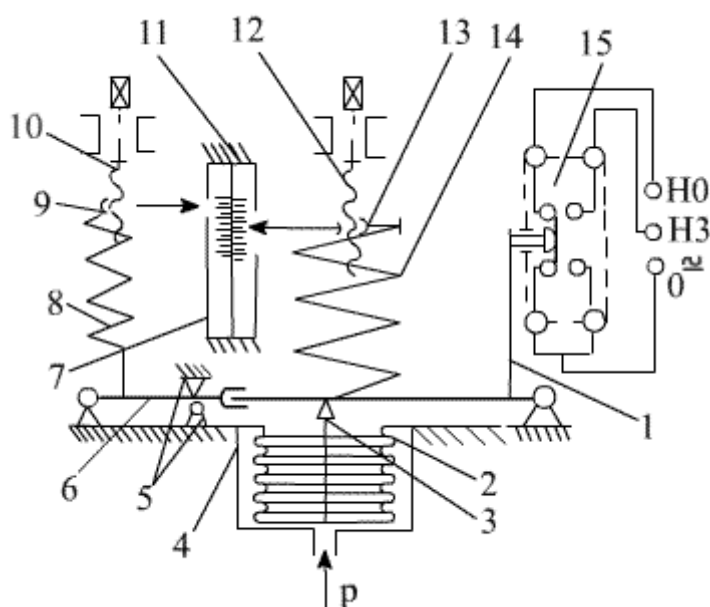


Рисунок 6.10 - Реле давления РД-12

где 1,6 –рычаг; 2-сильфон; 3-толкатель; 4-корпус; 5-ось; 7-шкала; 8,14-пружины; 9-указатель; 10-винт дифференциала; 11-шкала задания; 12-винт задания; 13-указатель задания; 15-микрореле.

При повышении измеряемого давления P сильфон 2 деформируется (разжимается) и преодолевает сопротивление пружины 14. Когда давление P достигает заданного давления (шкала 11), рычаг 1 переключит контакты микропереключателя 15. При понижении давления P на величину дифференциала, заданного по шкале 7 пружиной 8.

7 АВТОМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

8.1 Автоматические регуляторы.

8.2 Классификация регуляторов.

8.3 Позиционные регуляторы.

8.4 Интегральные регуляторы.

8.5 Пропорциональные регуляторы.

8.6 Пропорционально-интегральные регуляторы.

8.7 Дифференциальные регуляторы.

7.1 Автоматические регуляторы

Всякая САР состоит из двух взаимодействующих между собой частей: *объекта регулирования и регулятора.*

Автоматические регуляторы (АР) представляют собой большую группу автоматических управляющих устройств, которые вырабатывают регулирующее воздействие в САР, если регулируемая величина отклонится от заданного значения.

Регуляторы в основном состоят из элементов, выполняющих определенные функции как, измерительного элемента (датчик) 1, устройство сравнения 2, задающего устройства 3, управляющего устройства 4, исполнительного механизма 5 и регулирующего органа 6 (рис.7.1).

Датчик производит непрерывное измерение текущего значения регулируемой величины $Y_{\text{вых}}$ в объект управления (ОУ), который испытывает возмущающие воздействия f и преобразует эту величину в сигнал u_1 (например, электрический или пневматический).

Задающее устройство выдает сигнал u_0 , соответствующий заданному значению регулируемой величины. Устройство сравнения сравнивает

сигналы от датчика и задатчика и в случае их различия (если заданное значение регулируемой величины в данный момент не равно текущему) выдает сигнал рассогласования (разбаланс) Δy на управляющее устройство.

Управляющее устройство преобразует, а в случае необходимости усиливает этот сигнал, и с помощью исполнительного механизма и регулирующего органа осуществляет управляющее воздействие на объект управления, изменяя входную величину ($X_{зад}$) так, чтобы выходная величина $Y_{вых}$ приняла первоначальное значения.

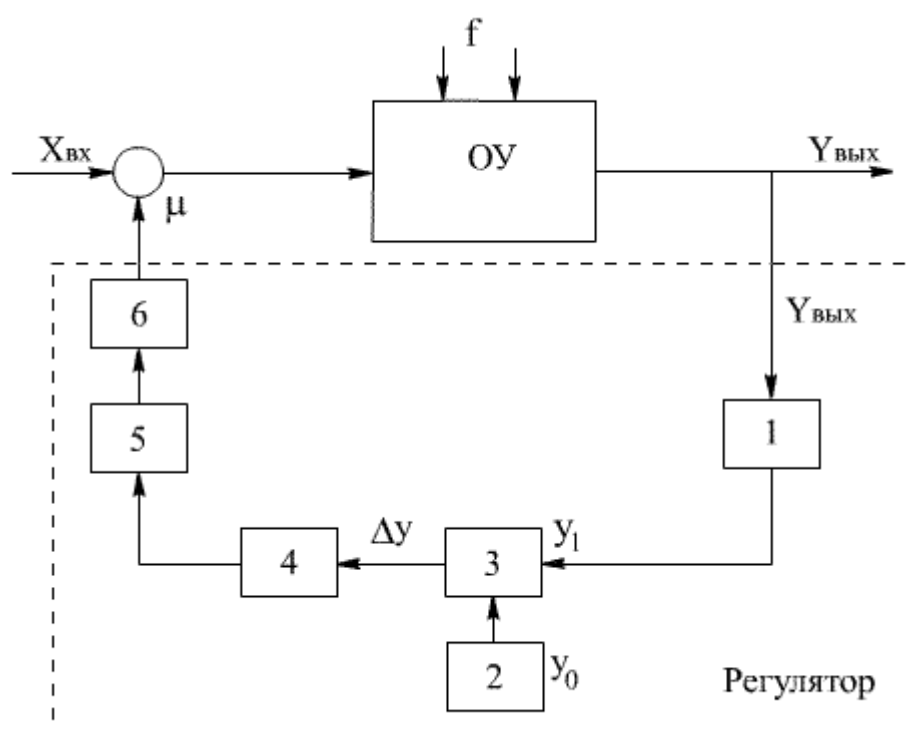


Рисунок 7.1 - Структурная схема регулятора

где 1-датчик; 2-устройства сравнения; 3-задатчик; 4-управляющее устройство; 5- исполнительный механизм; 6-регулирующий орган.

Все элементы регулятора (кроме задающего устройства) образуют замкнутую цепь воздействий, в которой соблюдается принцип детектирования (сигнал от выхода к входу проходит в одном направлении).

7.2 Классификация регуляторов

Автоматические регуляторы классифицируются по разным признакам. Например: по виду регулируемого параметра: регуляторы давления, расход, уровня, температуры и так далее; по роду действия: регуляторы прерывистые и не прерывистые; по способу действия: регуляторы косвенного и прямого действия.

Эти виды классификации регуляторов не являются определяющими, так как не характеризуют их свойства. Основной признак, по которому классифицируются регуляторы независимо от принадлежности к одной из перечисленных выше групп, является характеристика действия, то есть зависимость между изменением регулируемой величины и перемещением регулирующего органа.

По характеристике действия регуляторы подразделяются на следующие: позиционные (Пз) регуляторы; интегральные (И) регуляторы; пропорциональные (П) регуляторы; пропорционально-интегральные (ПИ) регуляторы; дифференциальные (Д) регуляторы (пропорционально-дифференциальные (ПД), пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы).

Входной величиной регулятора является сигнал, пропорциональный разности между заданным и текущим значениями управляемой (регулируемой) величины; выходной – положение регулирующего органа.

7.3 Позиционные регуляторы

Автоматические регуляторы (АР), у которых регулирующий орган может занимать ограниченное число определенных положений, называются **позиционным**. Позиционные (Пз) регуляторы относятся к группе регуляторов прерывистого действия. Чаще всего применяется двух- или трехпозиционные регуляторы.

У двухпозиционных регуляторов, в зависимости от знака отклонения управляемой величины, регулирующий орган либо полностью открыт, либо полностью закрыт. У двухпозиционных регуляторов, кроме двух крайних, регулирующий орган имеет еще одно (среднее) положение, что способствует более плавному изменению управляемой величины и сокращению числа срабатываний регулирующего органа в единицу времени.

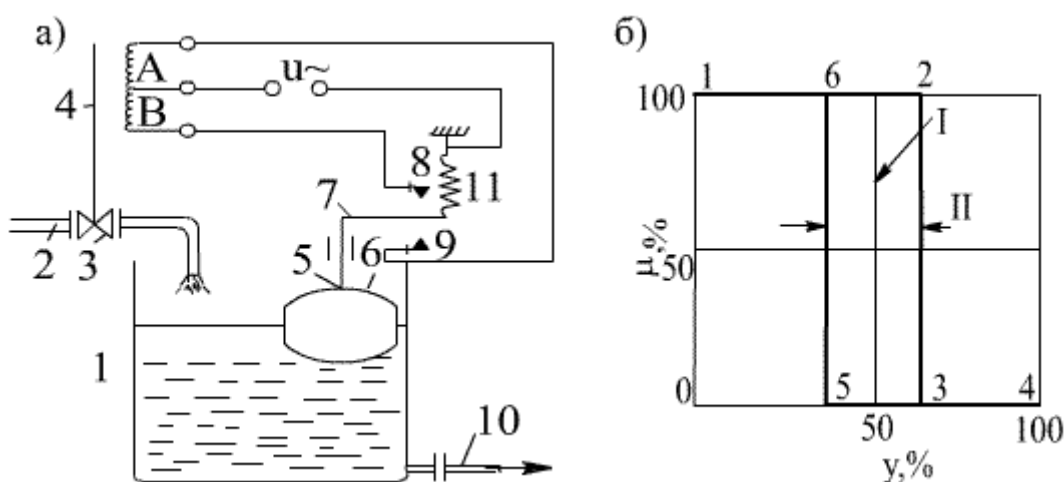


Рисунок 7.2 - Принципиальная схема (а) и статическая характеристика (б) Пз регулятора.

где а) 1-объект; 2-10 трубы; 3-регулирующий клапан; 4-сердечник; 5-шток; 6-поплавок; 7-рычаг-контакт; 8,9-передвижные упоры-контакты; 11-пружина.

б) I–заданное значение; II-нейтральная зона; 1-6 точки характеристики.

Принцип действия Пз регулятора следующий. Например, в объекте управления – бак 1 по трубе 2 подается жидкость, а по трубе 10 она расходуется потребителем (рис.7.2а).

Чувствительный элемент регулятора – поплавок 6 измеряет уровень в баке; текущее значение уровня определяется положением штока 5 и жестко с ним соединенного рычага – контакта 7, который через пружину 11 соединен с источником питания напряжением U . Заданные значения верхнего и

нижнего уровней определяются положением передвижных упоров – контактов 8 и 9, устанавливаемых вручную.

При подъеме уровня выше заданного контакта 7 замкнется с контактом 8 и под напряжением окажется обмотка **Б** тягового электромагнита, благодаря чему сердечник 4 мгновенно переместится вверх, что приведет к закрытию регулирующего органа 3 (клапана). При понижении уровня ниже заданного контакт 7 замкнется с контактом 9, под напряжением окажется обмотка **А** тягового электромагнита, якорь 4 переместится вниз, что приведет к открытию регулирующего органа. Приведенная схема является примером двухпозиционного регулирования.

Из статической характеристики двухпозиционного регулятора (рис.7.2,б) видно, что повышение уровня в баке соответствует перемещению по точкам 1,2,3,4; точки 2 и 3 соответствуют мгновенному перемещению регулирующего органа из положения “открыто” в положение “закрыто”, когда замкнутся контакты 7 и 8. Понижение уровня соответствует перемещению по точкам 4,5,6,1 статической характеристики.

7.4 Интегральные регуляторы

Автоматические регуляторы, у которых одному и тому же значению регулируемой величины могут соответствовать различные положения регулирующего органа, называется **интегральными**, или **астатическими** (*astatos* – неустойчивый, беспокойный).

Рассмотрим принцип работы регулятора на примере принципиальной схемы гидравлического И-регулятора косвенного действия (рис.7.3). При изменении давления **p** в трубопроводе изменяется давление на сильфон 1, дно которого перемещается, что ведет к повороту рычага ABC относительно точки A и перемещению поршней золотника 2 вверх или вниз. Когда **p** больше заданного, тогда дно сильфона переместится вниз, рычаг ABC повернется по часовой стрелке, поршни золотника отпустятся также вниз и

масло под давлением начнет поступать из камеры **e** цилиндра золотникового устройства в полость **m** цилиндра исполнительного механизма 7. Поршень исполнительного механизма (ИМ), связанный штоком с регулирующим органом (шибер) 6, начнет перемещаться вверх, увеличивая степень открытия шибера; это поведет к снижению давления **p**. В результате снижения давления сильфон 1 разжимается, возвращая рычаг ABC в исходном положение, поршни золотника перекрывают доступ масла в цилиндр ИМ, регулирующее действие прекращается.

Во время перемещения поршня ИМ вверх масло из полости **n** цилиндра вытесняется по трубке через камеру **d** цилиндра золотникового устройства и срабатывает на слив 5. Слившееся масло очищается и вновь подается в камеру **e** специальной насосной установкой.

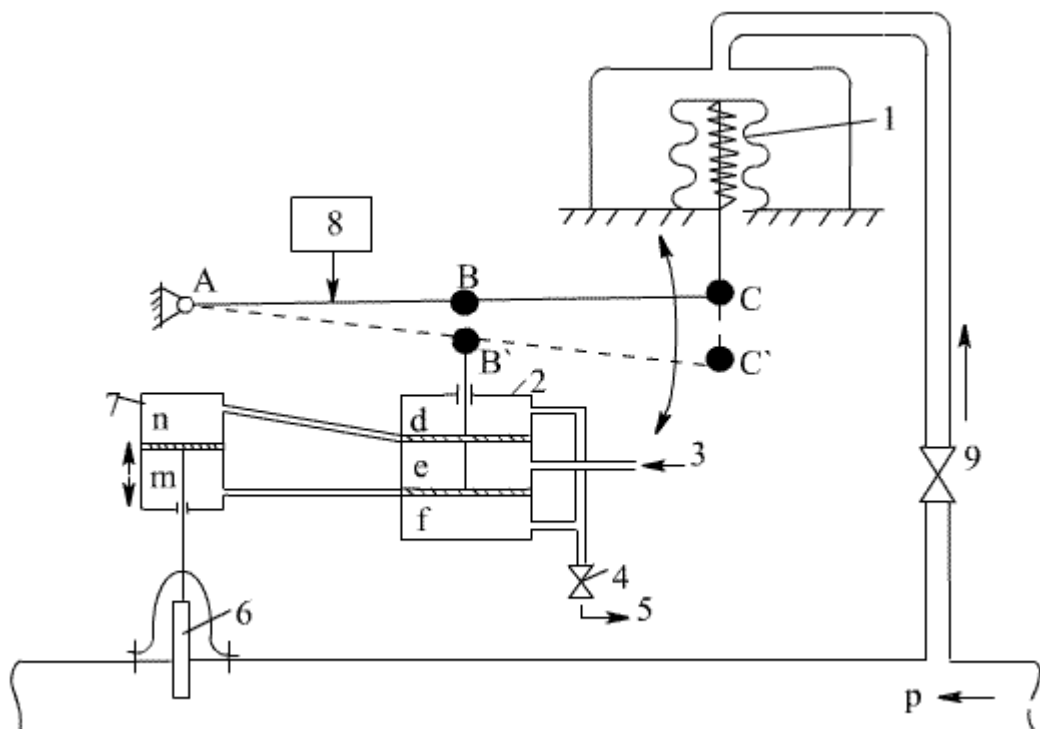


Рисунок 7.3 - Принципиальная схема И-регулятора косвенного действия:

где 1-сильфон; 2-золотник; 3-подача масла под давлением; 4,9-вентили; 5-слив масла; 6-регулирующий орган; 7-испольнительный механизм; 8-задатчик.

Если предположить, что давление p стало ниже заданного, то дно сильфона 1 переместится вверх, рычаг ABC повернется против часовой стрелки, переместив поршни золотника вверх, и масло через полость e будет поступать в полость n цилиндра ИМ. Это поведет к закрытию шиберов и увеличению давления p . При этом масло из полости цилиндра ИМ через полость f цилиндра золотникового устройства поступает на слив.

Заданное значение регулируемой величины устанавливается с помощью задатчика 8. Когда усилия, развиваемые сильфоном и пружиной задатчика, равный рычаг ABC находится в нейтральном положении и масло из камеры e не поступает в цилиндр ИМ.

В И-регуляторах отсутствует обратная связь, они просты по устройству. Важнейшей их особенностью является то, что независимо от величины нагрузки регулируемого объекта они приводят регулируемую величину к заданному значению. И-регуляторы имеют некоторые недостатки, обусловленными их динамическими свойствами. Малое отклонение регулируемой величины от заданного значения, И-регулятор продолжает перемещать регулирующий орган вплоть до положения полного открытия или закрытия. Перемена направления движения РО наступает лишь тогда, когда регулируемая величина проходит заданное значение.

Закон регулирования предусматривает воздействие регулятора со скоростью, пропорционально отклонению регулируемой величины, и описывается уравнением

$$\frac{d\mu}{dt} = -S_0 \Delta y$$

Здесь S_0 – специально рассчитываемый настроечный параметр регулятора. Знак минус означает, что при положительном отклонении регулируемой величины РО перемещается в сторону закрытия, а при отрицательном отклонении (уменьшения против заданного значения) – в сторону открытия.

Уравнение регулятора в интегральной форме:

$$\mu = -S_0 \int_0^t \Delta Y dt$$

Передаточная функция регулятора имеет вид

$$W(p) = \frac{\mu(p)}{y(p)} = -\frac{S_0}{p}$$

На рис 7.4,а показана статическая характеристика И - регулятора. Когда регулируемая величина y ниже заданного значения, регулирующий орган находится в крайнем нижнем положении. Как только регулируемая величина достигнет заданного значения, РО начнет перемещаться в сторону открытия и может остановиться в любой точке вертикального отрезка характеристик.

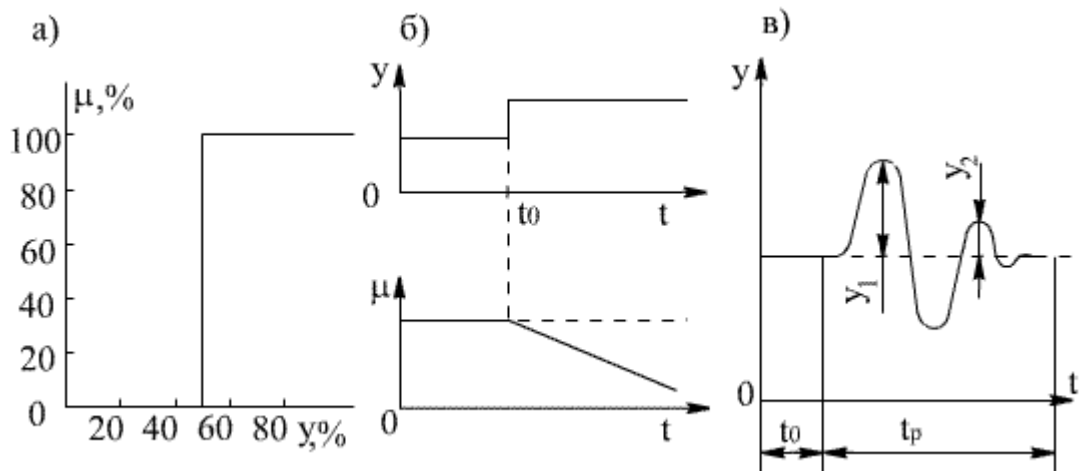


Рисунок 7.4 - Характеристики И – регулятора: а- статическая; б-кривая разгона; в- переходный процесс.

В результате действия регулятора регулируемая величина y приходит к заданному значению через некоторое время t_p , называемое **временем регулирования**; причем переходный процесс является колебательным, затухающим (рис.7.4, в). И–регулятор применяется только в системах самовыравниванием, в противном случае система будет неустойчивой.

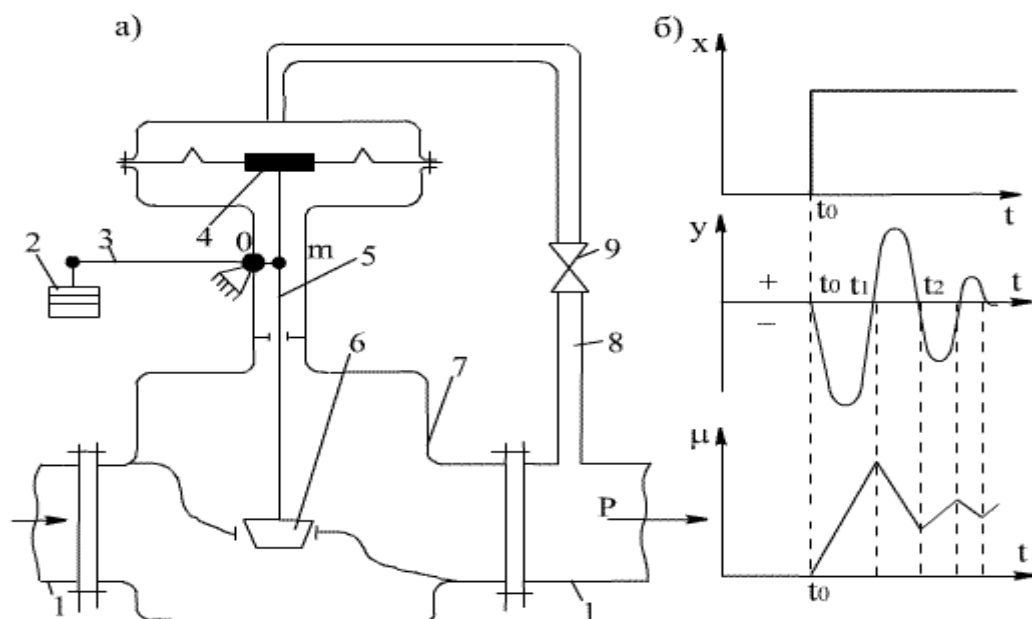


Рисунок 7.5 - Принципиальная схема (а) и динамическая характеристика (б) И – регулятора прямого действия

где 1- трубопровод; 2 - груз; 3 - рычаг; 4 - мембрана; 5 - шток; 6 - регулирующий орган; 7 - корпус; 8 - импульсная линия; 9 - вентиль.

На рис.7.5,а показано схема И - регулятора прямого действия. На трубопроводе 1 с помощью фланцевых и болтовых соединений укреплен корпус регулятор 7. Если регулируемая величина – давления p после регулятора – будет изменяться, изменение давления через импульсную линию 8 и вентиль 9 будет передаваться на мембрану 4 ИМ, связанную с РО 6 с помощью штока 5. В точке m имеется шарнир, соединяющий шток с рычагом 3, на котором укреплен груз 2, являющийся задающим устройством. Регулируемое давление p зависит от притока среды, т.е. от степени открытия РО 6. Когда p равно заданному значению, усилия, развиваемые мембранной 4 и грузом 2, равны, и шток 5 неподвижен. При увеличении или уменьшении давления по сравнению с заданным шток и РО 6 будет перемещаться соответственно вниз или вверх. Скорость перемещения пропорциональна отклонению фактической величины регулируемого давления от заданной.

Как видно из графика (рис 7.5,б) при изменении нагрузки x объекта в момент t_0 начинает изменяться регулируемая величина y и перемещаться

регулирующий орган. Изменение перемещения регулирующего органа происходит в момент перемены знака регулируемой величины (точки t_1, t_2).

7.5 Пропорциональные регуляторы

Автоматические регуляторы, у которых отклонение регулируемой величины от заданного значения вызывает перемещение регулирующего органа на величину, пропорциональную величине этого отклонения, называются **пропорциональными**, или **статическими** (*statos* -стоящий). Каждому значению регулируемого параметра соответствует одно определенное положение регулирующего органа. Эта пропорциональная зависимость достигается за счет действия жесткой обратной связи, поэтому П-регуляторы называются также регуляторами с жесткой обратной связью. Схема П - регулятора (рис.-7.6) отличается от схемы И - регулятора тем, что рычаг ABC не имеет шарнира в точке А, а с помощью штока 8 соединен с поршнем ИМ 7. Это соединение и образуют жесткую обратную связь. В результате возмущающего воздействия, которое приводит к возрастанию давления p в трубопроводе, точка С переместится в положение C' , а точка В – в положение B' и рычаг займет положение $AB'C'$. При этом поршни золотника 2 сместятся вниз и масло начнет поступать в полость m цилиндра исполнительного механизма, перемещая поршень ИМ, а в месте с ним и регулирующий орган 6 вверх. Вместе с поршнем изменяется положение А в положение A' (вверх) переместится левый конец рычага ABC, точка B' возвратится в положение В, а поршни золотника 2 возвратятся в исходное положение, перекрыв доступ масла в исполнительный механизма.

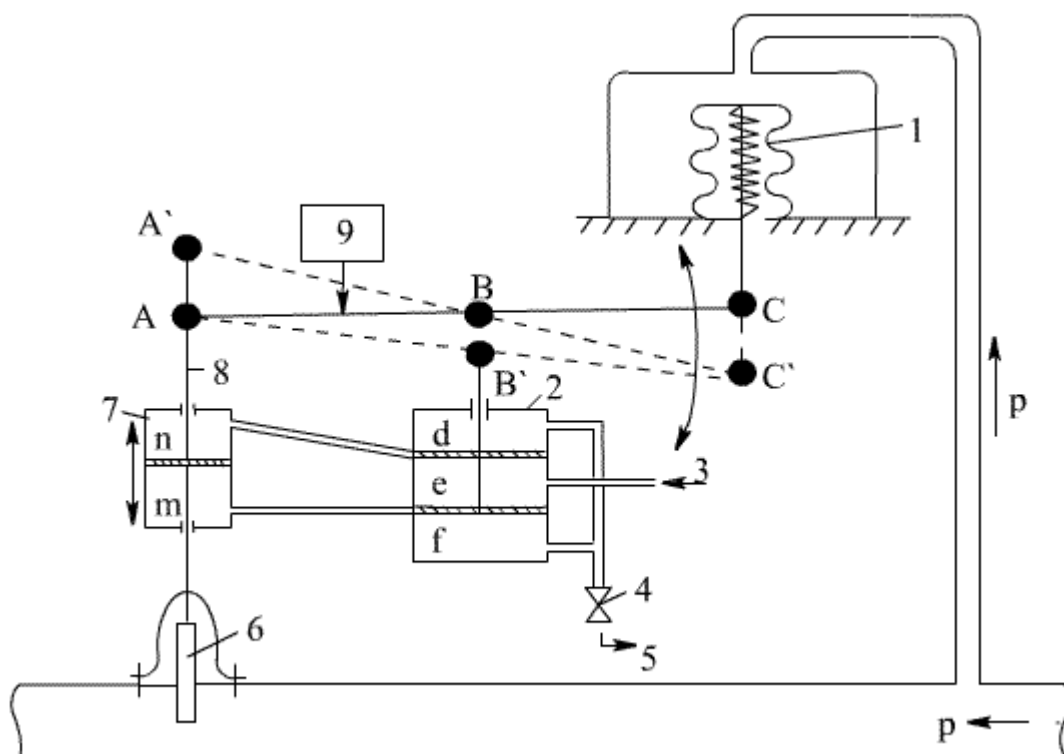


Рисунок 7.6 - Принципиальная схема П-регулятора косвенного действия

где 1 - сильфон; 2 - золотник; 3 - вход масла под давлением; 4 - вентиль; 5 - слив масла; 6 - регулирующий орган; 7 - исполнительный механизм; 8 - шток; 9 - задатчик.

Измерительный узел (сильфон 1) и механизм обратной связи воздействуют на РО практически одновременно. Поэтому перемещение РО надо рассматривать как результат действия измерительной системы, уменьшенный на какую-то величину обратной связи.

Быстродействие П - регулятора, чем И - регулятора, сравнительно быстро стабилизирует процесс и приводит систему в равновесное состояние.

Простейший статический регулятор представляет собой усилительное

звено и описывается уравнением
$$\mu = -S_1 \Delta y$$

Здесь S_1 —настроечный параметр (коэффициент усиления) П - регулятора.

Передаточная функция П-регулятора

$$W(p) = \frac{\mu(p)}{\Delta y(p)} = -S_1$$

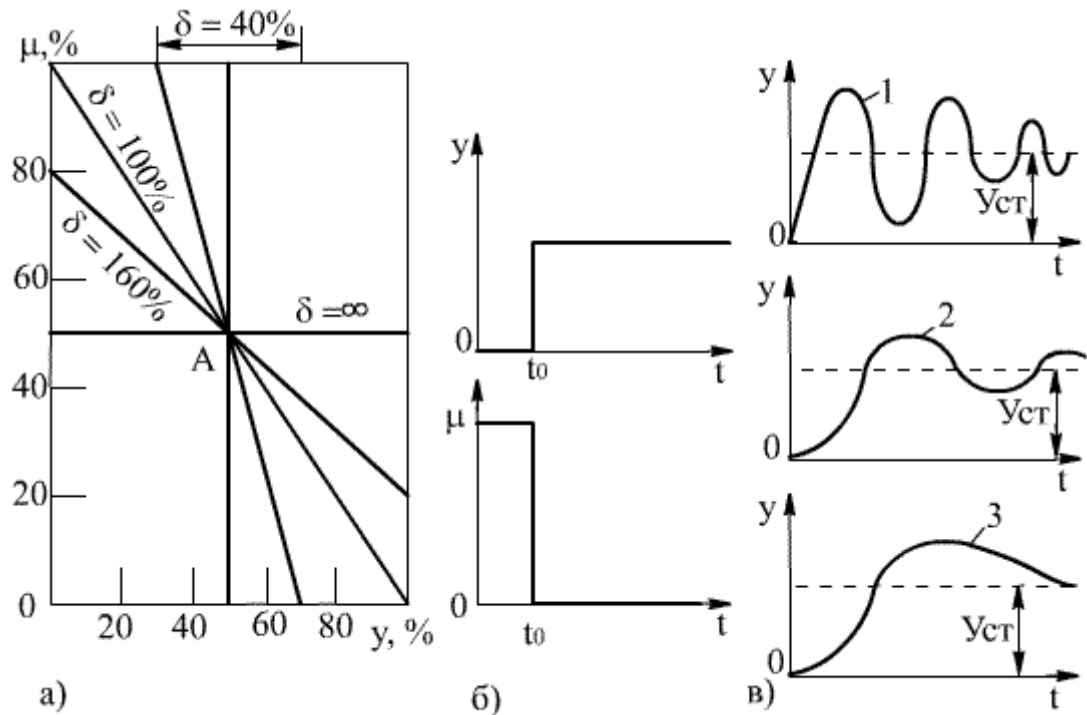


Рисунок 7.7 - Характеристики П-регулятора

где а - статические; б - кривая разгона; в - переходные процессы; 1 - статическая ошибка невелика; 2 - статическая ошибка несколько больше; 3 - статическая ошибка большая.

Статические и динамические характеристики П - регулятора изображено в рис. 7.7. Из семейства статических характеристик (рис. 7.7,а), видно, что РО начинает перемещаться только при достижении регулируемой величины нижнего предела пропорциональности. Предположим, что регулируемая величина соответствует 50% шкалы регулятора, а предел пропорциональности настроен на 40%. Регулирующий орган занимает среднее положение. Этому положению соответствует точка А на характеристике. Если теперь регулируемая величина начнет возрастать, то регулирующий орган станет перемещаться в сторону закрытия.

Кривая разгона П - регулятора (рис. 7.7,б) аналогична усилительному звену. Если в момент времени t_0 регулируемая величина y скачкообразно

изменится (например, возрастет), регулирующий орган также скачкообразно переместится в сторону закрытия.

На характеристики переходных процессов в автоматической системе с П - регулятором в сильной степени влияют установленные пределы пропорциональности. С увеличением коэффициента усиления S_1 , или, что то же, с уменьшением предела пропорциональности переходный процесс протекает в виде медленно затухающих колебаний, а статическая ошибка $Y_{ст}$ невелика (рис. 7.7, в кривая 1). При оптимальном для данного объекта коэффициенте усиления S_1 переходный процесс быстро затухает, однако статическая ошибка $Y_{ст}$ несколько возрастает (рис. 7.7, в кривая 2). Если коэффициент усиления S_1 слишком мал, то переходный процесс может стать аperiodическим с большой статической ошибкой (рис. 7.7, в кривая 2).

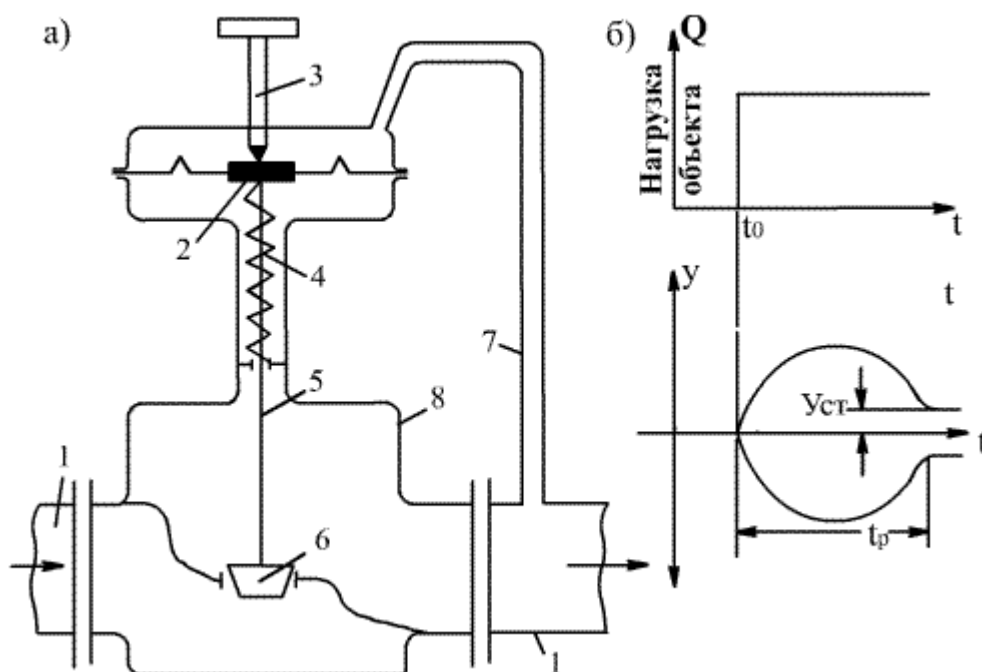


Рисунок 7.8 - Принципиальная схема (а) и динамическая характеристика (б) П - регулятора прямого действия:

где 1-трубопровод; 2-мембрана; 3-винт; 4-пружина; 5-шток; 6-регулирующий орган; 7-импульсная линия; 8-корпус.

На рис. 7.8 показано схема П - регулятора прямого действия. В отличие от И - регулятора, у П - регулятора прямого действия усилие, развиваемое

мембраной, уравнивается не грузом, а пружиной 4; чем больше отклонение давления p от заданного значения, тем сильнее прогибается мембрана, но тем плотнее сжимается пружина, противодействуя прогибу; этим и достигается пропорциональность между регулируемой величиной и перемещением РО.

При увеличении нагрузки Q объекта в момент времени t_0 регулируемая величина Y возрастает, но, благодаря перемещению регулирующего органа в сторону закрытия, через некоторое время t_p она стабилизируется (рис. 7.8,б). Однако в силу статической ошибки ее величина будет отличаться от заданного значения на $Y_{уст}$.

7.6 Пропорционально-интегральные регуляторы

Сравнение П - регуляторов и И - регуляторов показывает, что первые обладают преимуществом по динамическим свойствам и обеспечивают лучший переходный процесс регулирования; преимущество вторых – отсутствие статической ошибки, т.е. лучшие статические свойства.

ПИ – регулятор совмещает оба П и И регулятора. Таким образом, аналогично И - регулятору изодромный (от греческого *isos* - равный, подобный; *dromos*- бегущий) регулятор поддерживает постоянное значение регулируемой величины вне зависимости от нагрузки объекта, а при отклонении ее от заданного значения в начальный момент времени переместит регулирующий орган на величину, пропорциональную величине отклонения (как П-регулятор), затем продолжит перемещение регулирующего органа до исчезновения статической ошибки, т.е. приведет регулируемую величину к заданному значению.

ПИ - регулятор являются регуляторами косвенного действия. Принципиальная схема ПИ-регулятора гидравлического типа приведена на рис. 7.9.

В первоначальный период регулятор работает как пропорциональный. С увеличением регулируемой величины (давление p) поршень исполнительного механизма 7 и регулирующий орган 6 начнут перемещаться вверх. Поршень ИМ 7 соединим с точкой А рычага ABC не жестко (как у П регулятора), а через устройства изодрома, который состоит из цилиндра 9, заполненного маслом, поршня 8, жестко соединенного штоком с поршнем 7, игольчатого вентиля 12, установленного на линии перелива масла из полостей g и h и пружины 10, противодействующей перемещению точки А.

При сравнительно быстром перемещении поршня ИМ 7 цилиндр 9 и поршень 8 также перемещаются вверх, как одно целое, т.к. проходное сечение дросселя 12 невелико и масло не успевает перетечь из полости g в полость h. Точка А рычага ABC перемещается вверх, пружина 10 сжимается, а поршни золотникового устройства возвращается в исходное положение, прекращая подачу масла в цилиндр ИМ. Регулятор сработал как пропорциональный, но его действие на этом не закончилось. Сила пружины 10, приложенная к цилиндру 9 в точке А, заставит последний перемещаться вниз относительно неподвижного поршня 8; при этом масло из полости g начнет перетекать, через вентиль 12 в полость h. Точка А начнет опускаться вниз, точка В также опустится вниз и это приведет к дополнительному срабатыванию ИМ, т.е. к дополнительному перемещению РО вверх.

Действие регулятора прекратится, когда пружина 10 израсходует всю свою энергию, т.е. при достижении регулируемой величиной заданного значения. Естественно, что быстродействие изодромной составляющей регулятора будет зависеть от степени открытия вентиля 12.

ПИ - регуляторы могут применять в тех случаях, когда необходима высокая точность регулирования, для объектов любой емкости, как при наличии, так и при отсутствии самовыравнивания, при больших, но плавных изменениях нагрузки. ПИ –регулятор действует быстрее, чем И - регуляторы, но медленнее, чем П - регуляторы

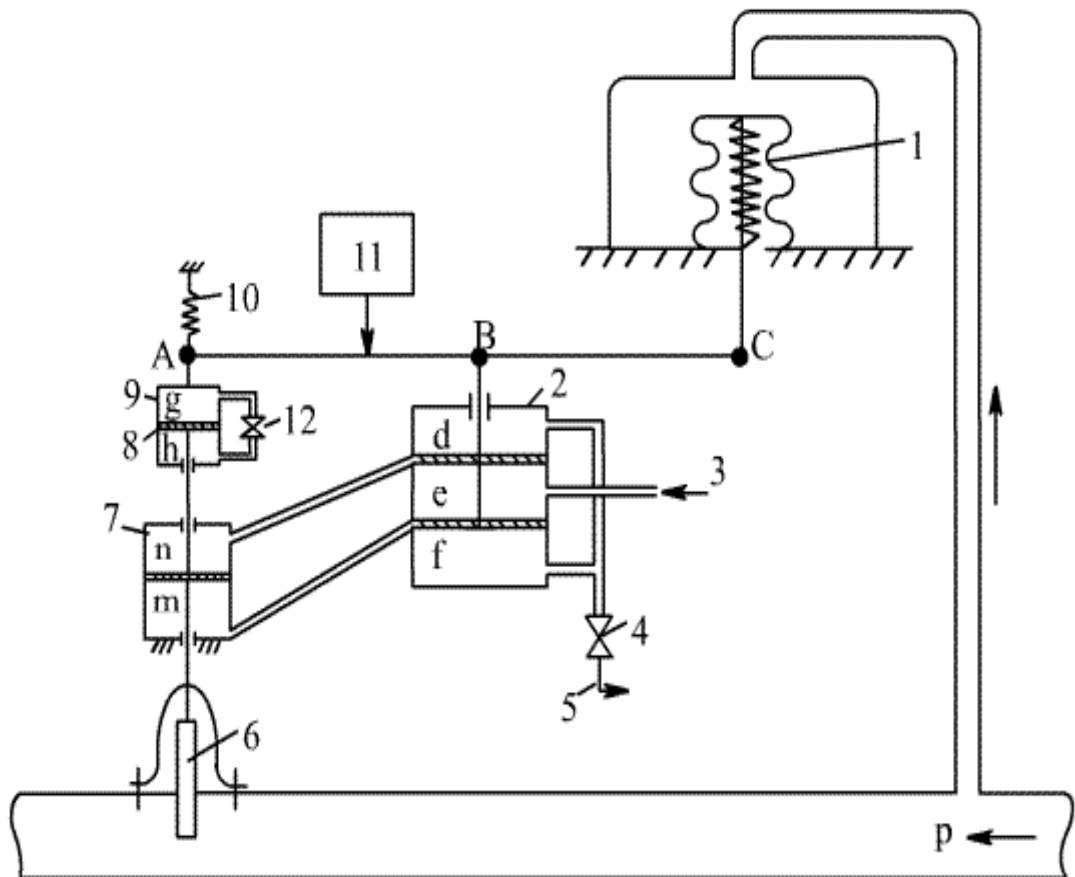


Рисунок 7.9 - Принципиальная схема ПИ-регулятора косвенного действия:

где 1-сильфон; 2-золотник; 3-вход масла под давлением; 4-вентиль; 5-слив масла; 6-регулирующий орган; 7-исполнительный механизм; 8-поршень; 9-цилиндр; 10-пружина; 11-задатчик; 12-игольчатый вентиль.

Уравнение ПИ – регулятора имеет вид

$$\mu_2 = -(S_1 \Delta y + S_0 \int_0^t \Delta y dt)$$

Передаточная функция ПИ-регулятора имеет вид:

$$W(p) = -(S_1 + \frac{S_0}{p})$$

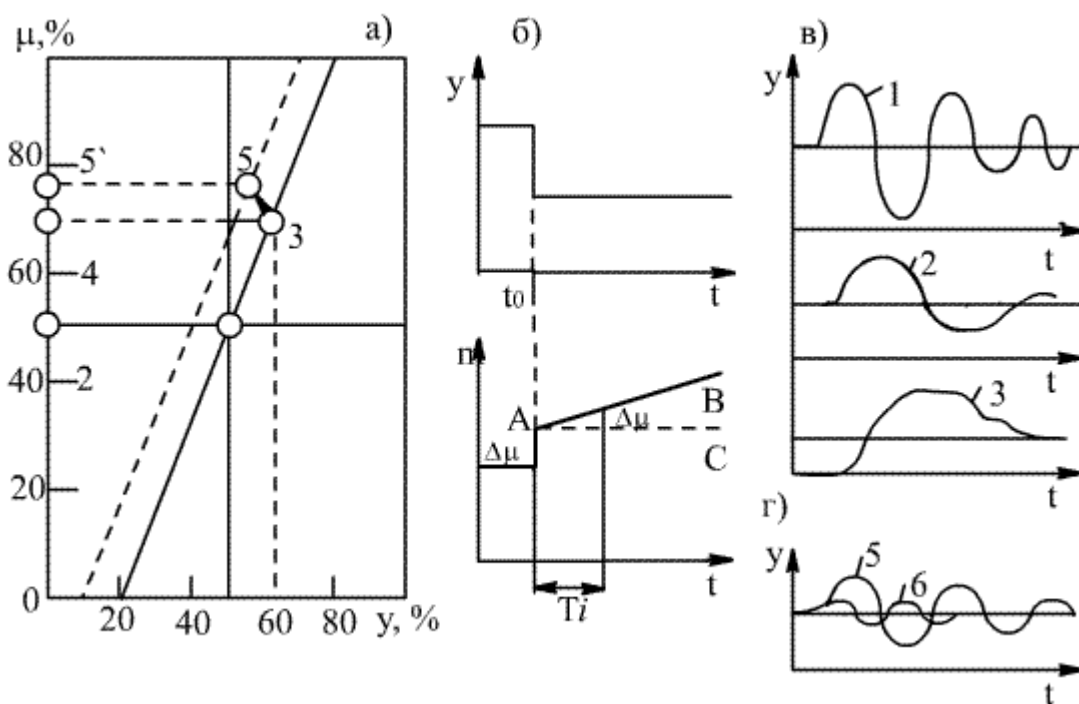


Рисунок 7.10 - Характеристики ПИ-регулятора

где а-статическая; б-кривая разгона; в-кривые переходных процессов; г- кривые вынужденные переходных процессов для ПИ- и И- регуляторов: 1-5 точки, характеризующие положение регулирующего органа; 6-10 – кривые переходных процессов.

Статическая характеристика ПИ-регулятора показана на рис. 7.10. Пусть регулятор настроен так, что при изменении регулируемой величины y , составляющем от 20 до 80% шкалы, регулирующий орган перемещается из одного крайнего положения в другое и пусть система находится в начале в равновесном состоянии (точки 1 и 2). Предположим, что регулируемая величина скачкообразно возросла до 60% шкалы (точка 3). Тогда вследствие воздействия пропорциональной составляющей регулятора положение регулирующего органа быстро изменится и достигнет примерно 68% своего хода (точка 4). Затем начнет медленно действовать узел изодрома, который возвратит регулируемую величину к заданному значению (точка 5); действие регулятора прекратится при новом положении регулирующего органа (точка 5'), соответствующего примерно 73% хода. Поскольку в процесс работы

регулятора предел пропорциональности не меняется, можно сделать вывод, что изодром как бы перемещает статическую характеристику параллельно самой себе (пунктирная линия).

Как видно из кривой разгона ПИ- регулятора (рис. 7.10,б), при скачкообразном возмущающем воздействии (резкое уменьшение регулируемой величины) в момент t_0 регулирующий орган быстро перемещается под действием пропорциональной составляющей. Затем он будет продолжать перемещаться в том же направлении с постоянной скоростью (линии АВ) под действием изодромной составляющей. Если в схеме регулятора (см. рис. 7.9) дроссель изодрома 12 закрыт (T_i), то регулятор работает как пропорциональный и его характеристикой является пунктирная линия АС на рис. 7.10,б. Чем больше открыт дроссель изодрома, т.е. чем меньше время изодрома T_i , тем больше скорость перемещения регулирующего органа, т.е. тем круче линия АВ.

На рис 7.10,в изображены кривые вынужденных переходных процессов при различной настройке коэффициента усиления S_1 и времени T_i регулятора. Кривая 6 соответствует переходному процессу при слишком большом S_1 или при слишком малом T_i . Время переходного процесса велико, колебания затухают медленно. Кривая 7 представляет оптимальной переходный процесс. Кривая 8 соответствует процессу при слишком малом коэффициенте усиления или слишком большом времени изодрома.

8.8 Дифференциальные регуляторы

Дифференциальные регуляторы бывают двух видов ПД-пропорционально - дифференциальные и ПИД - пропорционально-интегрально - дифференциальные.

Такие регуляторы целесообразно применять в тех случаях, когда нагрузка объектов регулирования изменяется часто и быстро, а запаздывания велики. Уравнение ПИД - регулятора имеет вид:

$$\mu = -(S_1 \Delta y + S_0 \int_0^t \Delta y dt + S_2 \frac{d(\Delta y)}{dt})$$

Здесь S_2 – параметр настройки регулятора, учитывающий скорость изменения регулируемой величины по времени.

Передаточная функция ПИД - регулятора имеет вид:

$$W(p) = \frac{s_0 + s_1 + s_2 p^2}{p}$$

Дифференциальные регуляторы называются *регуляторами с предварением*. Сущность предварения (без учета запаздывания) заключается в следующем.

Пусть регулируемый параметр y изменяется по экспоненте 1 (рис. 7.11,а). Первая производная от параметра (кривая 2) представляет собой тангенс угла наклона к касательной к соответствующей точке экспоненты 1 и имеет максимальное значение в начальный момент, когда параметр только начинает изменяться, а в момент t_1 , когда изменение прекращается, равно нулю.

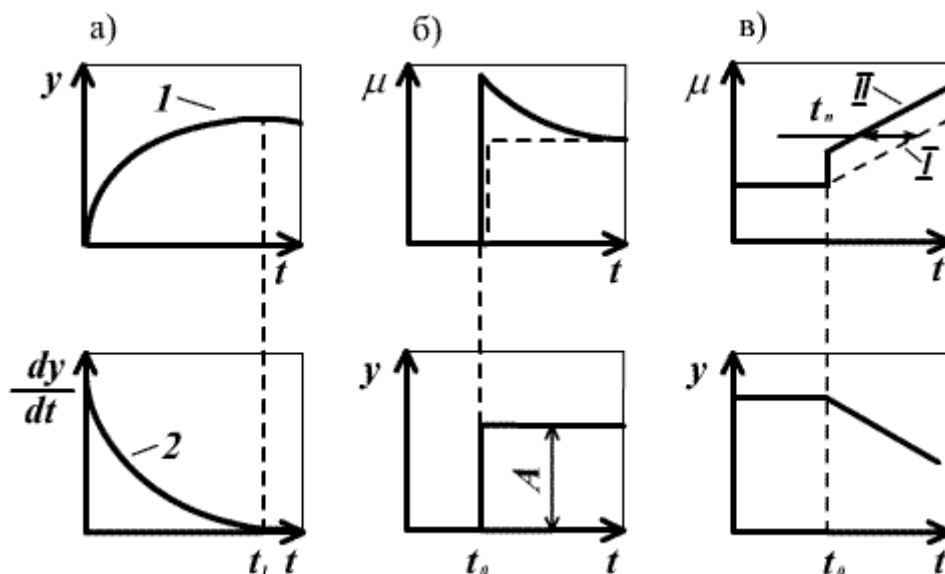


Рисунок 7.11 - Характеристики регулятора с предварением где а-переходный процесс (1) и его производная (2); б, в - варианты перемещения регулирующего органа; I - для П регулятора; II - для Д регулятора.

Эффект предварения можно определить так. Если регулируемая величина y (рис.7.11,б) изменит свое значение на величину A , то выходной сигнал регулятора, подаваемый на регулирующий орган, будет иметь характер, соответствующий сплошной кривой. Для сравнения пунктиром показано действие П - регулятора. В процессе регулирования в регуляторах с предварением происходит как бы изменение пределов пропорциональности. Причем вначале это отклонение резкое, а затем оно приходит к настроечному значению.

При непрерывном изменении регулируемой величины y , начиная с момента времени t_0 (рис.7.11,в), регулирующий орган П - регулятора будет перемещаться согласно пунктирной прямой I , а у Д-регулятора – согласно сплошной линии II . Регулятор как бы предваряет ожидаемое отклонение параметра. Время предварения t_n определяет относительную величину дополнительного сигнала по производной (оно связано с настроечным параметром) и настраивается обычно в пределах от 0,1 до 1 мин.

Действие регулятора с предварением рассматривается на примере регулирования температуры в объекте управления, где в качестве теплоносителя используется горячий газ (рис. 7.12,а).

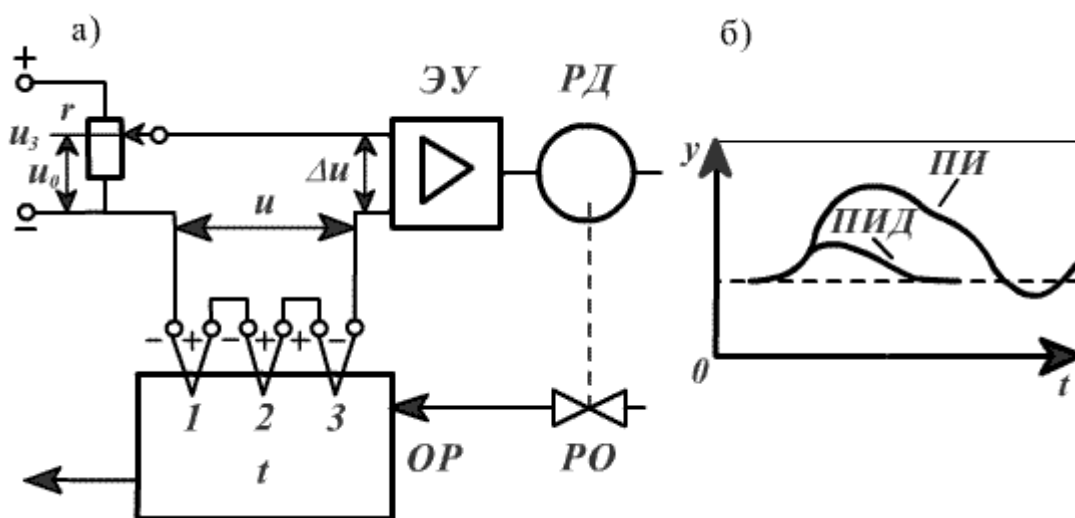


Рисунок 7.12 - Принципиальная схема регулятора с предварением (а) и график переходных процессов ПИ и ПИД регуляторов (б)

где ОР - объект регулирования; 1-3 – термопара; r - реостат задатчика; ЭУ - усилитель; РД - реверсивный двигатель; РО - регулирующий орган

Устройство, осуществляющее действие с предварением, состоит из трех термопар 1, 2, 3, которые являются чувствительным элементом регулятора. Термодатчики 1 и 2 включены последовательно (их термо ЭДС складываются), а термопары 1 и 2 включены встречно (ее термо ЭДС вычитается из суммы двух первых). Масса горячего спая термопары 3 значительно больше массы спаев каждой из первых двух. В состоянии теплового равновесия все три спая имеют одинаковую температуру и равную ТЭДС. Общая ТЭДС такой батареи будет равна ТЭДС одной из термопар 1 или 2.

Если регулируемая температура t в объекте управления начнет изменяться с определенной скоростью, то ТЭДС первых двух термопар с одинаковой скоростью будут отражать эти изменения, а изменение ТЭДС термопары 3 будет отставать от первой и второй тем больше, чем больше различие масс горячих спаев термопар 1 и 2, с одной стороны, и термопары 3 – с другой, а также, чем больше скорость изменения температуры.

Таким образом, термопара 1 вырабатывает сигнал, пропорциональный самой регулируемой величине (температуре t), а термопары 2 и 3 – сигнал, пропорциональный скорости ее изменения (\dot{t}).

Результирующая ТЭДС всех трех термопар u сравнивается с падением напряжения u_0 на сопротивлении r задатчика, которое пропорционально заданному значению регулируемой величины. Термобатарея из трех термопар и источник питания u_3 задатчика включены встречно. При нарушении температурного режима в объекте на вход электронного усилителя ЭУ поступает сигнал $\Delta u = u_0 - u$, причем в первый момент величина сигнала значительна и реверсивный двигатель РД интенсивно перемещает РО, резко изменяя подачу теплоносителя, а затем, когда сигнал Δu , достигнув максимума, начнет уменьшаться, реверсивный двигатель начнет плавно перемещать РО в другую сторону, уменьшая подачу теплоносителя и приводя параметр к заданному значению.

На рис. 7.12,б показан график переходных процессов для ПИ и ПИД законов регулирования.

8 ПРИНЦИПЫ СОСТАВЛЕНИЯ СХЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ

8.1 Стадии разработки конструкторской документации.

8.2 Условные обозначения в функциональных схемах автоматического контроля и управления.

8.3 Щиты и пульты управления.

8.4 Назначение и содержание функциональных и электрических схем. Мнемонические схемы.

8.1 Стадии разработки конструкторской документации

Проектирование систем автоматизации технологических процессов выполняется специализированными проектными организациями в строгом соответствии с требованиями Единой системы конструкторской документации (ЕСКД). Согласно ГОСТ 2.103-68 предусматривается пять стадий разработки конструкторской документации на изделия (предмет или набор предметов производства) всех отраслей промышленности:

- техническое задание (ТЗ),
- техническое предложение (ТП),
- эскизный проект (ЭП),
- технический проект,
- рабочая документация.

Техническое задание устанавливает основное назначение, показатели качества разрабатываемого изделия, его технические и тактико-технические характеристики, технико-экономические требования, предъявляемые к нему, необходимые стадии разработки конструкторской документации, ее состав, а также специальные требования к изделию.

Техническое предложение- это совокупность конструкторских документов, которые должны содержать технические и технико-

экономические обоснования целесообразности разработки документации изделия.

Эскизный проект - это совокупность конструкторских документов, которые должны содержать принципиальные конструктивные решения, дающие общее представление об устройстве и принципе работы изделия, а также данные, определяющие назначение, основные параметры и габаритные размеры разрабатываемого изделия.

Технический проект – это совокупность конструкторских документов, которые должны содержать окончательные технические решения, дающие полное представления об устройстве разрабатываемого изделия, и исходные данные для разработки рабочей документации.

Рабочая документация включает корректировку конструкторских документов по результатам изготовления контрольной серии.

Рабочие чертежи выполняются в соответствии с ЕСКД, действующими стандартами на условные обозначения, руководящими и нормативными документами по проектированию и монтажу систем автоматики, электрического и противопожарного проектирования. На стадии «рабочие чертежи» или «техно - рабочий проект» включает следующую техническую документацию:

- структурные и функциональные схемы автоматических систем;
- принципиальные электрические, гидравлические, пневматические схемы управления, регулирования, блокировки, сигнализации, а также электрические схемы питания;
- общие виды и монтажные схемы щитов и пунктов;
- схемы внешних электрических и трубных проводок, а также их монтажные чертежи;
- чертежи установки аппаратуры, щитов и пультов;
- пояснительная записка и т.д.

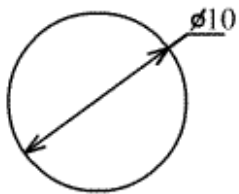
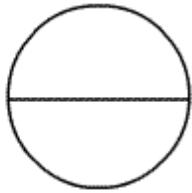
8.2 Условные обозначения в функциональных схемах автоматического контроля и управления

Функциональная схема автоматического контроля и управления содержит упрощенное изображение технологической схемы автоматизируемого процесса. Оборудование на схеме показывается в виде условных изображений. На функциональной схеме изображаются системы автоматического контроля, регулирования, дистанционного управления, сигнализации, защиты и блокировок.

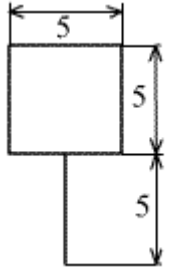
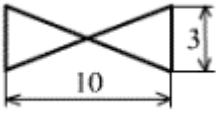
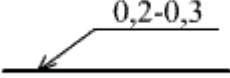
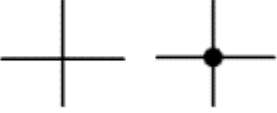
В соответствии с ГОСТ 3627-77 «Приборы и средства автоматизации. Обозначения условные в схемах автоматизации технологических процессов» устанавливаются обозначения измеряемых величин, функциональные признаки приборов, линии связи, а также способы и методика построения условных графических обозначений приборов и средств автоматизации.

Некоторые примеры условных графических изображений приведены в таблице 8-1.

Таблица 8.1 - Графическая обозначение элементов автоматизации

№	Наименование	Обозначение
1	Первичный измерительный преобразователь (датчик); прибор, устанавливаемый по месту;	
2	Прибор, устанавливаемый на щите, пульте	

Продолжение таблицы 8.1

3	Исполнительный механизм. Общее обозначение	
4	Регулирующий орган	
5	Общее обозначение линии связи	
6	Пересечение линий связи с соединением и без него.	

Условные обозначения измеряемых величин выполняются следующими заглавными буквами латинского алфавита:

- D** – плотность;
- E** – любая электрическая величина;
- F** – расход;
- G** – размер, положение, перемещение;
- H** – ручное воздействие;
- K** – время, временная программа;
- L** – уровень;
- M** – влажность;
- N** – резерв (аппаратура управления электродвигателей);
- O** – резерв;
- P** – давление, вакуум;
- Q** – качество (состав, концентрация и т.п.);
- R** – радиоактивность;

S – скорость, частота;

T – температура;

U – несколько разнородных величин, измеряемых одним прибором ;

V – вязкость;

W – масса;

X – nereкомендованная резервная буква.

Функции выполняемые приборами:

A – сигнализация;

C – регулирование, управление;

I – показание;

R – регистрация

S – включение, отключение, переключение;

Для ***уточнения значений измеряемой величины и указания верхнего и нижнего пределов измеряемой величины*** также используются следующие обозначения:

D – разность, перепад;

F – соотношение, доля, дробь;

H – верхний предел измеряемой величины;

I – автоматическое переключение, обегание;

L – нижний предел измеряемой величины;

Q – интегрирование, суммирование по времени;

Для ***функциональных признаков приборов*** применяются следующие обозначения:

E – первичные преобразователи (термопары, термометры, сопротивления и т.п.);

T – приборы с дистанционной передачей показаний (манометрические термометры);

K – приборы со станциями управления (переключатель "автоматическое - ручное");

Y – преобразователь сигналов и вычислительных устройств.

Эти дополнительные обозначения вписываются в верхней части окружности, на втором месте после буквы, обозначающей измеряемую величину. Например: ТЕ – термопара, термометр сопротивления; РТ – бесшкальный манометр с дистанционной передачей.

При обозначении преобразователей сигналов и вычислительных устройств применяются следующие дополнительные буквенные обозначения и символы:

Е, Р, G – сигналы соответственно электрический, пневматический, гидравлический;

A, D - сигналы соответственно аналоговые и дискретные;

K, X, :, f_n , $\sqrt[n]{x}$ – операции соответственно суммирования, умножения на постоянный коэффициент, умножения, деления, возведения сигнала в степень, извлечения корня.

Эти дополнительные буквенные обозначения указываются вне окружности, справа от нее.

В функциональных схемах автоматизации, последовательности буквенных обозначений должно быть следующей:

1. обозначение основной измеряемой величины;
2. обозначение, дополнительное (уточняющее основную) измеряемую величину;
3. обозначение функционального признака прибора.

Функциональные признаки, если несколько в одном приборе, то порядок расположения следующий : I, R, C, S, A.

В нижней части окружности, наносится обозначение позиций (цифровые или буквенно-цифровые).





Рисунок 8.1 - Схема построения кода условного обозначения прибора систем автоматизации.

В схемах автоматизации широко используются обозначения различных устройств, на основе стандартов ЕСКД. Некоторые примеры отдельных устройств приведены в табл. 8-2.

Таблица 8.2 - Графические обозначение элементов схем автоматизации

Наименование	Обозначение
Двигатель асинхронный с короткозамкнутым ротором	ИЛИ
Сельсин - датчик угла поворота и сельсин-приемник	
Трансформатор напряжения измерительный	ИЛИ
Предохранитель плавкий, общее обозначение	
Звонок электрический	
Гудок	

<p>Резистор переменный</p>	
<p>Конденсатор постоянный емкости</p>	
<p>Конденсатор электролитический</p>	
<p>Датчик измеряемой неэлектрической величины</p>	
<p>Диод. Общее обозначение. Тиристор триодный, запираемый: а - по аноду; б - по катоду</p>	
<p>Катушка электромеханического устройства (реле)</p>	
<p>Контакт коммутационного устройства: а-замыкающий; б-размыкающий; в - переключающий</p>	
<p>Выключатель кнопочный с контактами: а-замыкающий; б-размыкающим</p>	
<p>Лампа накаливания осветительная и сигнальная</p>	


Рассмотрим некоторые примеры построения условных обозначений:

Таблица 8.3 - Примеры условных обозначений приборов и средств автоматизации

Наименование и функции	Обозначение
Первичный измерительный преобразователь для измерения температуры, установленной по месту. Например: термопара, термометр сопротивления.	
Прибор для измерения температуры показывающий, установленной по месту. Например: термометр ртутный, термометр манометрический.	
Прибор для измерения температуры показывающей, установленный на щите. Например: милливольтметр, потенциометр.	
Прибор для измерения температуры с автоматическим обегаяющим устройством, регистрирующий установленный на щите. Например: многоточечный самопишущий потенциометр, мост автоматический.	
Прибор для измерения температуры регистрирующий, регулирующий, установленный на щите. Например, самопишущий регулятор температуры.	
Регулятор температуры бесшкальный, установленный по месту. Например: дилатометрический регулятор температуры.	
Комплект для измерения температуры регистрирующий, регулирующий, снабженный станцией управления, установленный на щите.	

<p>Регулятор давления, работающий без использования построенного источника энергии (прямого действия).</p>	
<p>Прибор для измерения давления (разряжения) показывающий, установленный по месту – показывающий манометр, тягомер, напоромер и т.п.</p>	
<p>Прибор для измерения давления (разряжения) регистрирующий, установленный на щите – самопишущий манометр или другой вторичный прибор регистрации давления</p>	
<p>Прибор для измерения любой электрической величины показывающий, установленный по месту.</p>	
<p>Прибор для измерения уровня бесшкальный, с дистанционной передачей показаний, установленный по месту.</p>	
<p>Прибор для измерения плотности раствора бесшкальный, с дистанционной передачей показаний, установленный по месту.</p>	
<p>Прибор для измерения влажности регистрирующий (вторичный), установленный на щите.</p>	
<p>Прибор для измерения скорости вращения привода регистрирующий, установленный по месту. Например: тахогенератор</p>	
<p>Прибор для измерения вязкости раствора показывающий, установленный на щите.</p>	

<p>Пусковая аппаратура для управления электродвигателем.</p>	
<p>Аппаратура ручного дистанционного управления, снабженная устройством сигнализации, установленная на щите.</p>	
<p>Первичный измерительный преобразователь для измерения качества продукта, установленный по месту. Например: датчик рН-метра.</p>	
<p>Прибор для измерения радиоактивности, показывающий, контактным устройством, установленный по месту. Например: прибор для показания и сигнализации предельно-допустимых концентраций δ и γ –лучей.</p>	
<p>Прибор для измерения вязкости раствора, показывающий, установленный по месту. Например: вискозиметр показывающий.</p>	
<p>Преобразователь сигнала, установленный на щите. Входной сигнал электрический, выходной – тоже электрический. Например: преобразования т.э.д.с. термопары в сигнал постоянного тока.</p>	
<p>Преобразователь сигнала, установленный по месту. Входной сигнал – пневматический, выходной – электрический.</p>	
<p>Первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент) для измерения расхода, установленный по месту. Например: сопло, диафрагма, индукционный датчик расхода и т.п.</p>	

Вычислительное устройство, выполняющее функцию умножения. Например: множитель на постоянный коэффициент К.	
--	---

8.2 Щиты и пульты управления

Основное назначение щитов и пультов – централизация средств контроля и управления производственным процессом, которые выполняют функции постов управления и являются связующим звеном между объектом управления и оператором.

Щиты представляют собой вертикальные металлические панели или шкафы, на которых устанавливаются приборы контроля и регулирования, сигнальные устройства, мнемонические схемы, накладные надписи с пояснениями назначения отдельных панелей и т.д.

Пульты – корпуса, имеющие форму стола с наклонной плоскостью, которые используются для размещения на них аппаратуры управления, сигнализации и переключателей измерительных цепей.

По назначению щиты разделяются на местные, агрегатные, блочные и центральные, так же оперативные (основные) и вспомогательные.

Оперативные щиты служат для непосредственного контроля и управления технологическими процессами. Вспомогательные щиты предназначены для общего контроля и наблюдения за работой агрегатов и установок, для регистрации отдельных параметров в целях учета и последующего анализа этой работы, а также для дублирования в необходимых случаях оперативного контроля, защиты и управления.

Конструкция щита изготавливается по требованиям стандарта. Основная высота щитов 2200 мм. Длина щита определяется числом и размещением стандартных секций шириной 1200, 1000, 800 или 600 мм.

Компоновку приборов и аппаратуры на щите выполняют с учетом следующих правил:

- 1) приборы располагаются таким образом, чтобы каждая панель или группа панелей отображали определенный участок технологического процесса и относились к одному агрегату;
- 2) приборы можно концентрировать по функциональному признаку (панель измерения приборов, регуляторов и т.п.);
- 3) можно объединять приборы, контролирующие определенный технологический параметр как одного агрегата, так и ряда агрегатов технологического процесса (панель расходомеров, газоанализаторов).

При компоновке приборов на панелях необходимо также учитывать их функции:

- 1) приборы, контролирующие наиболее важные, ответственные параметры процесса, располагают в зоне «эффективного вида» оператора;
- 2) приборы, используемые наиболее часто, также необходимо сконцентрировать в зоне «эффективного вида»;
- 3) приборы, контролирующие работу одного объекта, рекомендуется объединять на щите в компактную группу, зрительно четко выделяемую на фоне общего приборного комплекса;
- 4) размещение аппаратуры должно соответствовать зрительному маршруту снятия показаний с приборов, принятому согласно алгоритму контроля; при этом приборы размещают слева направо и сверху вниз.

При установке приборов и аппаратуры управления на фасадных сторонах щитов (рис. 8.2) высоту их размещения от уровня пола принимает по табл. 8-3.

Таблица 8-3.	
Высота размещения аппаратуры на щитах (без пультов)	
Средства автоматизация	Высота, мм
Сигнальная аппаратура дальнего образа	2000-2100
Показывающие приборы, не требующие постоянного обслуживания	1500-2000
Самопишущие приборы оперативного контроля; регулирующие приборы, требующие постоянного обслуживания	1100-1600
Индикаторы, указатели положения, сигнальная аппаратура ближнего обзора	850-1200
Аппаратура управления (переключатели, ключи, кнопки, панели управления)	600-1100

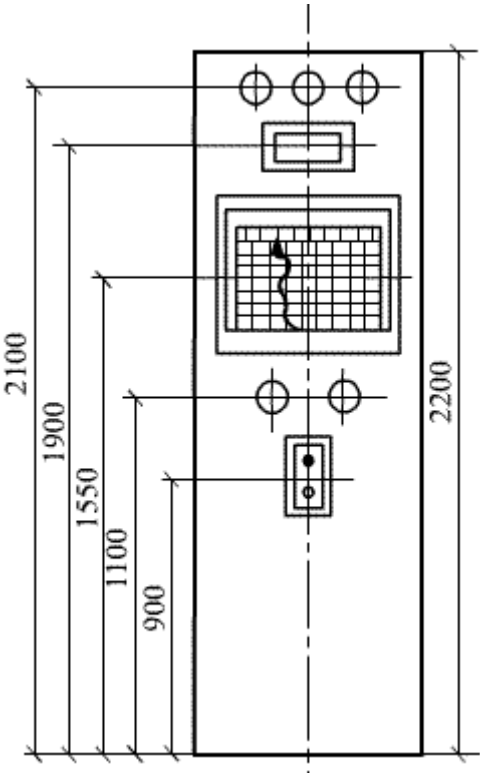


Рисунок 8.2 - Пример размещения приборов и аппаратуры на фасаде щита

8.4 Назначение и содержание функциональных и электрических схем. Мнемонические схемы

Функциональная схема автоматического контроля и управления предназначена для отображения основных технических решений, принимаемых при проектировании систем автоматизации технологических процессов.

При создании функциональной схемы определяют:

- 1) целесообразный уровень автоматизации технологического процесса;
- 2) принципы организации контроля и управления технологическим процессом;
- 3) технологическое оборудование, управляемое автоматически, дистанционно или в обоих режимах по заданию оператора;

- 4) перечень и значения контролируемых и регулируемых параметров;
- 5) методы контроля, законы регулирования и управления;
- 6) объем автоматических защит и блокировок автономных схем управления технологическими агрегатами;
- 7) комплект технических средств автоматизации, вид энергии для передачи информации;
- 8) места размещения аппаратуры на технологическом оборудовании, на щитах и пультах управления.

На функциональной схеме изображаются системы автоматического контроля, регулирования, дистанционного управления, сигнализации, защиты и блокировок. Все элементы систем управления показываются в виде условных изображений и объединяются в единую систему линиями функциональной связи.

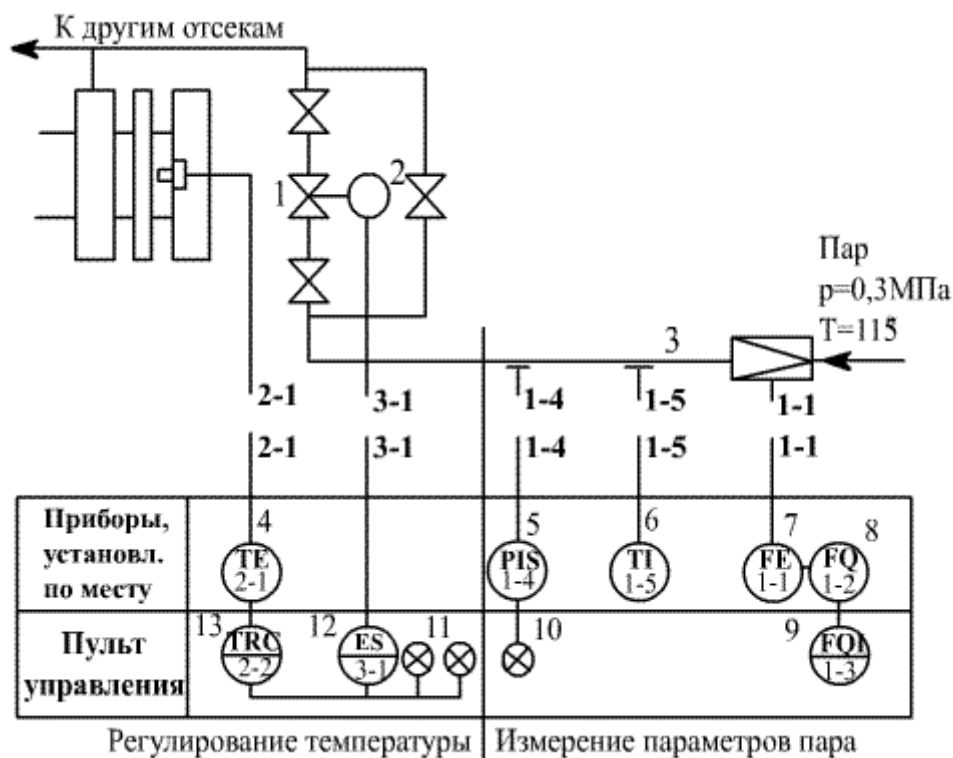


Рисунок 8.3 - Упрощенная функциональная схема автоматизации тепловлажностной обработки изделий в кассетных установках.

где 1- клапан; 2 - исполнительный механизм; 3 - редуктор расхода пара; 4 - преобразователь температуры в электрический сигнал TE; 5 - манометр электроконтактный PIS, обеспечивающий сигнализацию при отсутствии

минимально допустимого давления пара в магистрали; 6 - термометр электроконтактный ПТ, показывающий температуру пара в магистрали; 7 - преобразователь расхода пара FE в электрическую величину; 8 - интегратор расхода пара FQ; 9 - показывающий прибор расхода пара FQI за установленный интервал времени; 10, 11 - сигнальные лампы; 12 - преобразователь электрического сигнала ES в сигнал включения электромагнитного клапана; 13 - регулятор температуры с ее регистрацией TRC.

Элементы щита и пульта управления изображаются на функциональной схеме автоматизаций. Верхняя часть в функциональной схеме приводится схема процесса или объекта управления и условного обозначения датчиков прибора измерения предназначенных для измерения технологического параметра, т.е. первичные преобразователь.

Связь между первичным преобразователем и вторичными приборами показывается сплошной линией или обрыв линии с нумерацией (рис. 8.3).

Указанные на рисунке приборы являются: датчиками температуры бетона, температуры теплоносителя (пара), давления и расхода пара в магистрали 4, 7, 8; вторичными измерительными приборами расхода пара, температуры и давления пара 5, 6, 7, 8, 9; регулятором заданного закона изменения температуры бетона 13; исполнительным механизмом 2; регулирующим органом 1; средствами сигнализации 10, 14. Приборы 7, 8 совмещают функции первичного и вторичного измерительных приборов.

В системах автоматического контроля и управления различными технологическими процессами значительное место занимают электрические приборы, аппараты, устройства, которые служат для обеспечения управления, блокировки, сигнализации и защиты.

Для изображения взаимной электрической связи приборов и устройств служит электрическая схема. По своему назначению электрические схемы подразделяются на *принципиальные, полные и монтажные*.

Принципиальные схемы служат для того, чтобы наиболее просто и наглядно условно изобразить устройства, входящие в схему, показать взаимную электрическую связь между ее отдельными элементами с учетом последовательности работы, т.е. дать представление о принципе действия (Например рис. 7.9 принципиальная схема ПИ-регулятора).

Полные схемы. На основании принципиальных схем в некоторых случаях составляют полные электрические схемы, охватывающие весь комплекс агрегатов.

Монтажные схемы. По монтажным схемам производится монтаж соответствующей аппаратуры и устройств. Эти схемы выполняются по принципиальным схемам с учетом территориального расположения всей аппаратуры, вида зажимов, способов и направлений прокладки соединительных проводов и кабелей и т.п.

Форма исполнения принципиальных электрических схем должна облегчать их чтение, усвоение и анализ.

Мнемоническая схема (мнемосхема) – условное графическое отображение технологических процессов, поточно-транспортных линий, энергетических и других систем. Она выполняется на щите или пульте управления как комплекс символов, изображающих технологических агрегатов с их взаимными связями.

Наглядно отображая структуру управляемого процесса, мнемосхема облегчает оператору запоминание схем объектов, взаимозависимость между ними. Мнемоническая схема, органами управления, малогабаритными измерительными приборами, образует информационную модель конкретной системы управления. Мнемосхемы целесообразно использовать в тех случаях, когда управляемые объекты имеют сложные схемы с большим числом контролируемых параметров.

По конструктивным признакам символов, изображающих технологическое оборудование, мнемосхемы делятся на *мимическое* (*несветящиеся*), *световые* и *полусветовые*.

Мимическая схема выполняется символами в виде цветных накладных пластин соответствующей формы, изображающих оборудование и связи между ними.

Световая мнемосхема выполняется высвечиваемыми символами различных цветов.

В полусветовых схемах освещаются только отдельные символы агрегатов и узловые точки технологических потоков.

9 АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

9.1 Задачи и принципы автоматизации.

9.2 Автоматизация теплоподготовительных установок ТЭЦ и котельных.

9.3 Автоматизация насосных подстанций.

9.4 Автоматическое регулирование барабанных паровых котлов

9.5 Автоматизация узлов горячего водоснабжения.

9.6 Автоматическое регулирование процессов горения и парообразования.

9.7 Регулирование перегрева пара

9.1 Задачи и принципы автоматизации

Автоматизация водяных систем теплоснабжения способствует поддержанию заданных гидравлических и тепловых режимов в различных их точках. Основную роль в решении этих задач играют устройства автоматического регулирования и автоматической защиты.

Центральный метод регулирования на ТЭЦ или в котельных не может обеспечить заданные гидравлические у многих численных и разнородных потребителей теплоты, поэтому применяют несколько ступеней регулирования.

На теплоподготовительной установке ТЭЦ или котельной осуществляется регулирование давления воды перед сетевыми насосами, защита от повышения давления сетевой воды, регулирования температуры сетевой воды в подающем турбопроводе за основными подогревателями или пиковыми водогрейными котлами, регулирование уровня конденсата в

подогревателях и защита их от переполнения конденсатом, регулирование деаэраторов подпиточной воды.

На перекачивающей насосной подстанции автоматизируются сами насосы (автоматическая блокировка с основными сетевыми насосами, включение резерва и т.д), устройства подпитки и регулирования давления перед насосами, защита от повышения давления.

На ЦТП (центральных тепловых пунктах) для систем отопления осуществляется регулирование температуры воды после насосов смешения по отопительному графику, регулирование температуры воды на нужды горячего водоснабжения; на абонентских вводах при наличии ЦТП - местное регулирование режима отпуска теплоты на отопление и местное регулирование воздухоподогревателей вентиляционных систем.

9.2 Автоматизация теплоподготовительных установок ТЭЦ и котельных

Схемами автоматизации теплоподготовительных установок ТЭЦ и котельных предусматривается:

- 1) управление подпиточными насосами и регулирование давления воды в обратном трубопроводе станции или на перемычке;
- 2) регулирования давления и уровня воды в теплофикационных деаэраторах;
- 3) регулирование теплопроизводительности сетевых подогревателей и их автоматическая защиты;
- 4) автоматическое включение резервных сетевых насосов и защита от повышения давления сетевой воды.

Автоматизация подпиточных устройств. Подпиточные устройства поддерживают постоянное (или изменяющееся по определенному закону) давление воды во всасывающем коллекторе сетевых насосов. Для закрытых тепловых сетей с небольшими потерями давления воды в магистралях и

благоприятном рельефе местности давление в точках подпитки при всех режимах поддерживается постоянным. Это достигается изменением подачи подпиточной воды из тепловой сети. Утечки воды в закрытой тепловой сети изменяются во времени и носят случайный характер. При аварийных ситуациях применяются резервные подпиточные насосы, которые включаются автоматически.

В открытых тепловых сетях расход подпиточной воды определяется переменным водоразбором на горячее водоснабжение.

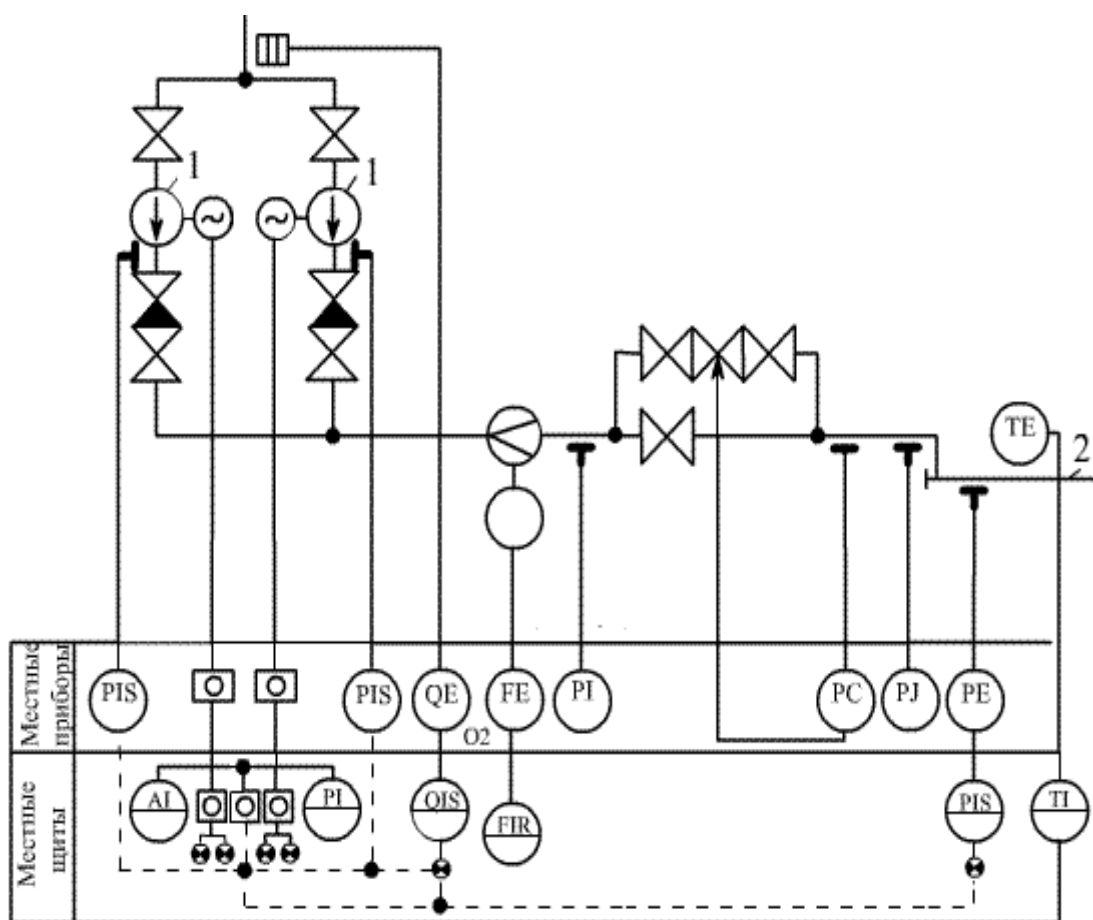


Рисунок 9.1 - Схема автоматизации теплоснабжения: 1-подпиточные насосы; 2-обратный трубопровод.

В схеме автоматизации подпиточных устройств при закрытой системе теплоснабжения (рис. 9.1) предусматривается поддержания постоянного давления в обратном коллекторе тепловой сети на станции перед сетевыми

насосами регулятором подпитки. Обычно используются П или ПИ регуляторы.

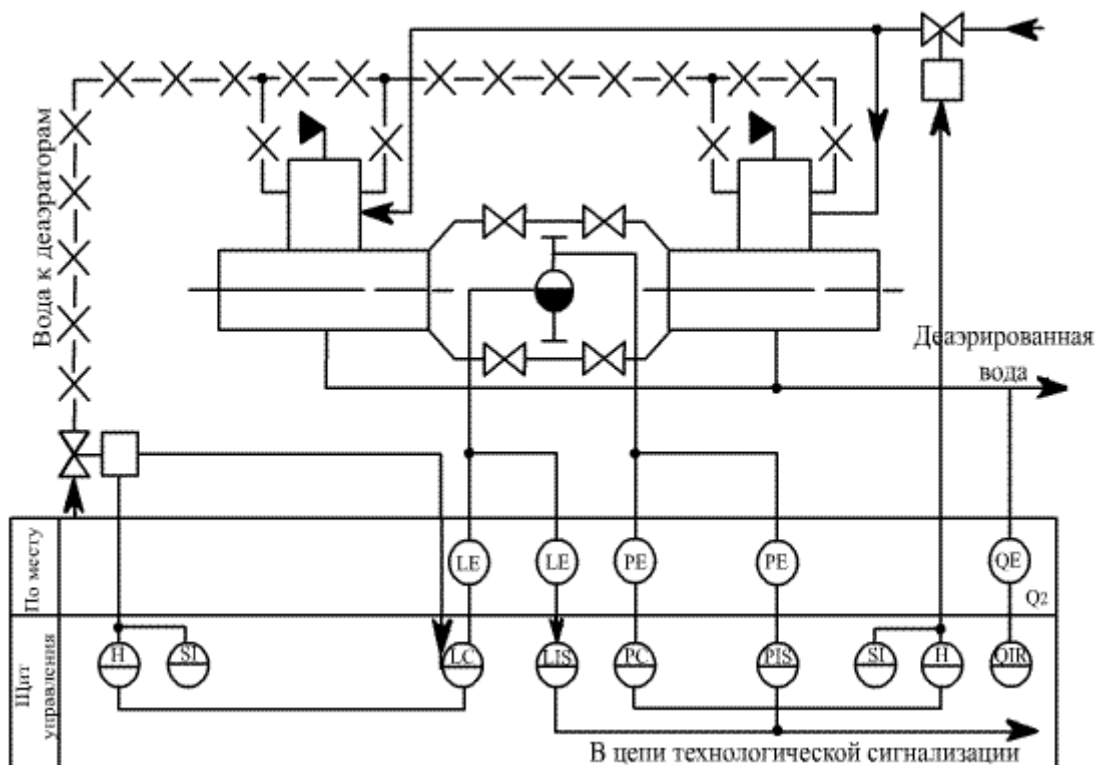


Рисунок 9.2 - Схема автоматизация установки с двумя деаэраторами

Автоматизация теплофикационных деаэраторов. При установке на станции на линии подпиточной воды вакуумного деаэратора осуществляется автоматическое регулирование уровня воды в деаэрационном баке (рис. 9.2). В установившемся режиме среднее значение уровня должно быть постоянным, а в переходных допускаются колебания ± 200 мм. По динамическим свойствам деаэрационный бак является интегрирующим звеном

$$T \frac{d\varphi}{dt} = k\lambda$$

где T - время разгона; φ - относительное отклонение регулируемого уровня; λ – регулирующее воздействие; k - передаточный коэффициент.

Для регулирования уровня и давления применяется ПИ- регуляторы.
Автоматизация сетевых подогревателей. При автоматизации сетевых подогревателей одной из основных задач является регулирование

температуры сетевой воды на выходе из подогревателей (рис. 9.3,а и б). В обоих случаях применяются ПИ-регуляторы.

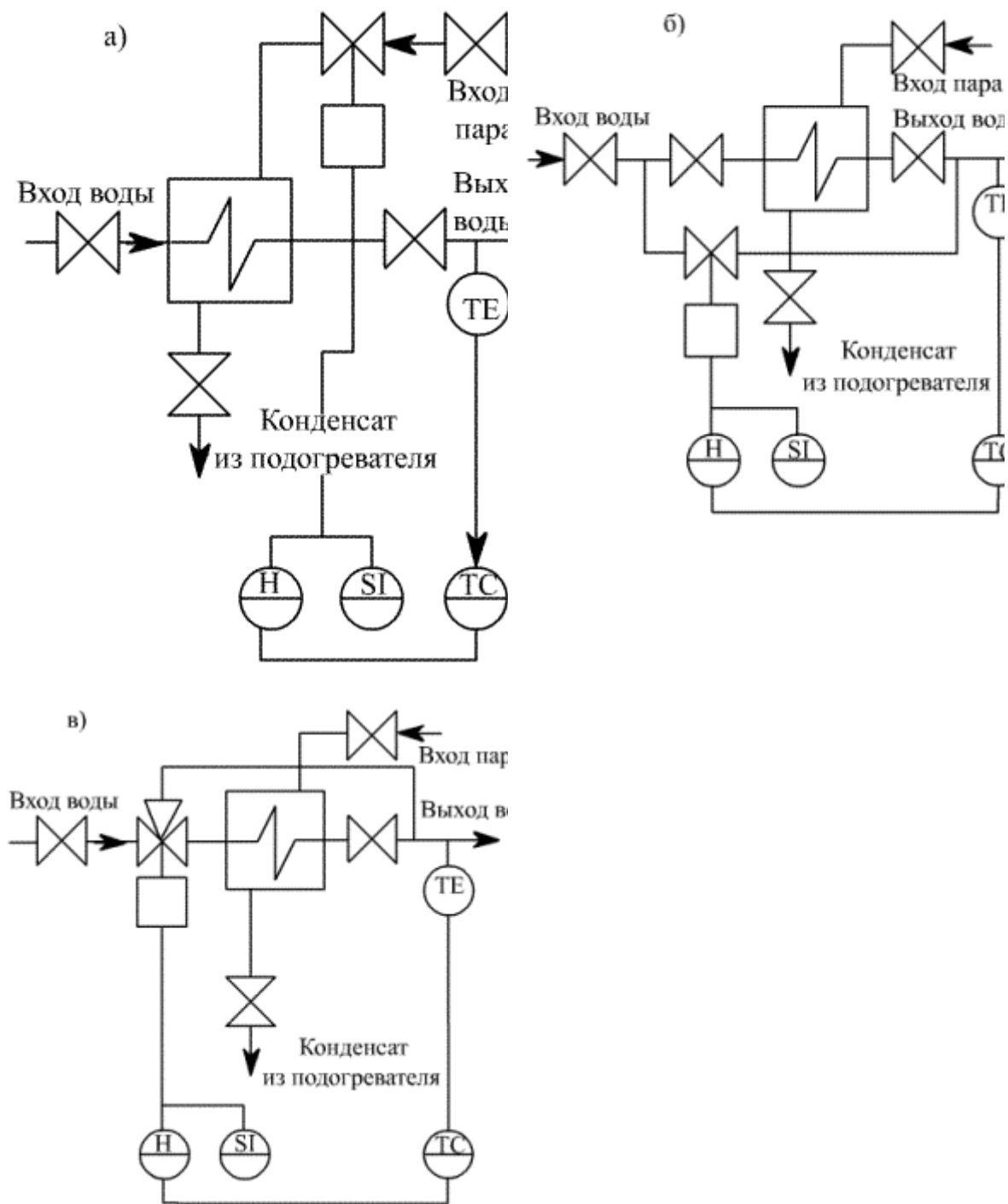


Рисунок 9.3 - Схемы регулирования температуры сетевой воды за подогревателями дросселированием греющего пара (а), перепуском части воды в обводах подогревателя с помощью регулирующего клапана на обводной линии (б) с помощью трехходового регулирующего клапана (в).

Схема пропуска части воды в обвод подогревателя также используется трехходового регулирующего клапана (рис. 9.3,в).

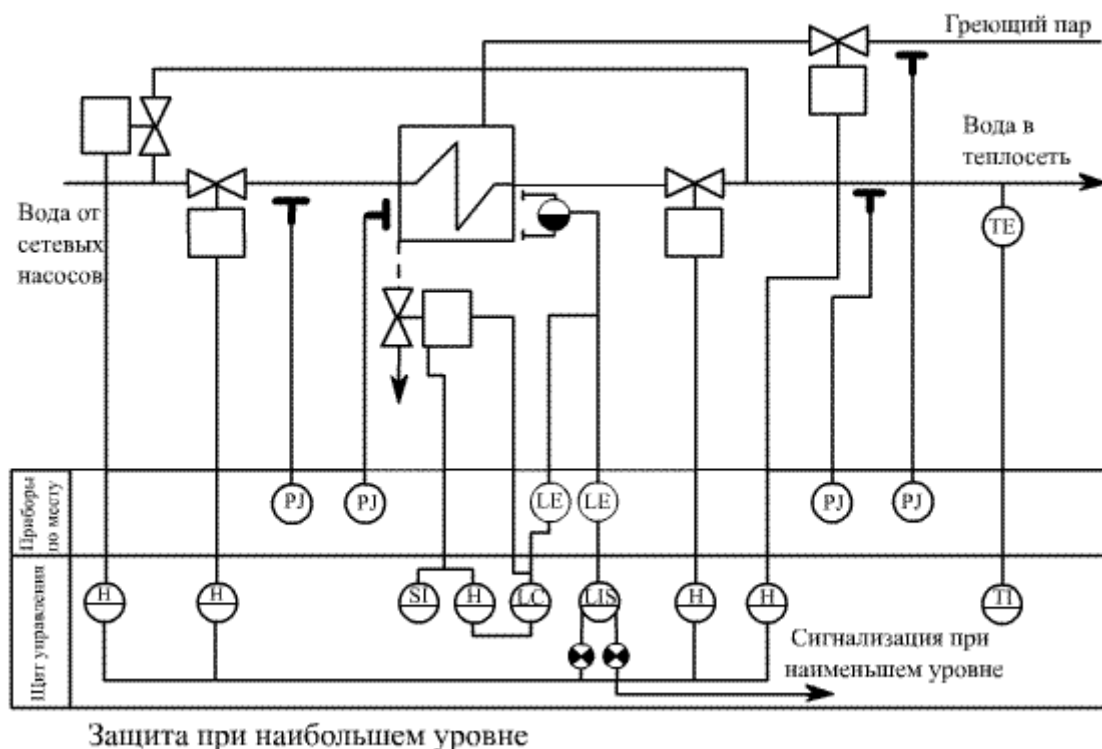


Рисунок 9.4 - Схема регулирования уровня конденсата и защиты подогревателей от переполнения конденсатом.

В сетях пароводяного подогревателя требуется также поддерживать уровень конденсата в деаэрационных пределах исходя из условий оптимального теплообмена в подогревателе. Допускаемое отклонение уровня конденсата ± 200 мм.

Схема автоматического регулирования уровня конденсата и защиты подогревателей от переполнения представлена на рис 9.4.

Защита от переполнения конденсатом осуществляется путем автоматического закрытия задвижек на трубопроводах сетевой воды и пара и открытия задвижки на обводной линии.

9.3 Автоматизация насосных подстанций

Основное назначение насосных подстанций – изменение давления в подающем или обратном трубопроводе за подстанцией, а также увеличение пропускной способности тепловой сети.

Атоматизацией насосной подстанции на подающей магистрали предусматриваются:

- 1) блокировка насосных агрегатов (АВР);
- 2) блокировка электродвигателей насоса и задвижек на напорном патрубке насоса;
- 3) автоматическое включение резервного насоса при падении давления в напорном патрубке работающего;
- 4) автоматическое переключение на резервный источник электропитания;
- 5) сигнализация о неисправностях работы насосной подстанции.

При автоматизации насосной подстанции на обратной магистрали дополнительно предусматривается постоянное давление во всасывающем коллекторе насосной подстанции, так как постоянство давления во всасывающем коллекторе влияет на надежность работы отопительных систем.

9.4 Автоматизация узлов горячего водоснабжения

Основная задача автоматического регулирования систем горячего водоснабжения – поддержание постоянной заданной температуры воды в местах ее разбора. Для обеспечения качественного снабжения потребителей горячей водой необходимо непрерывная работа циркуляционного насоса. При закрытой системе теплоснабжения, когда на вводах горячего водоснабжения устанавливают водоводяные подогреватели, широко применяется схема регулирования температуры нагреваемой воды путем изменения количества сетевой воды (рис. 9.5 а,б,в).

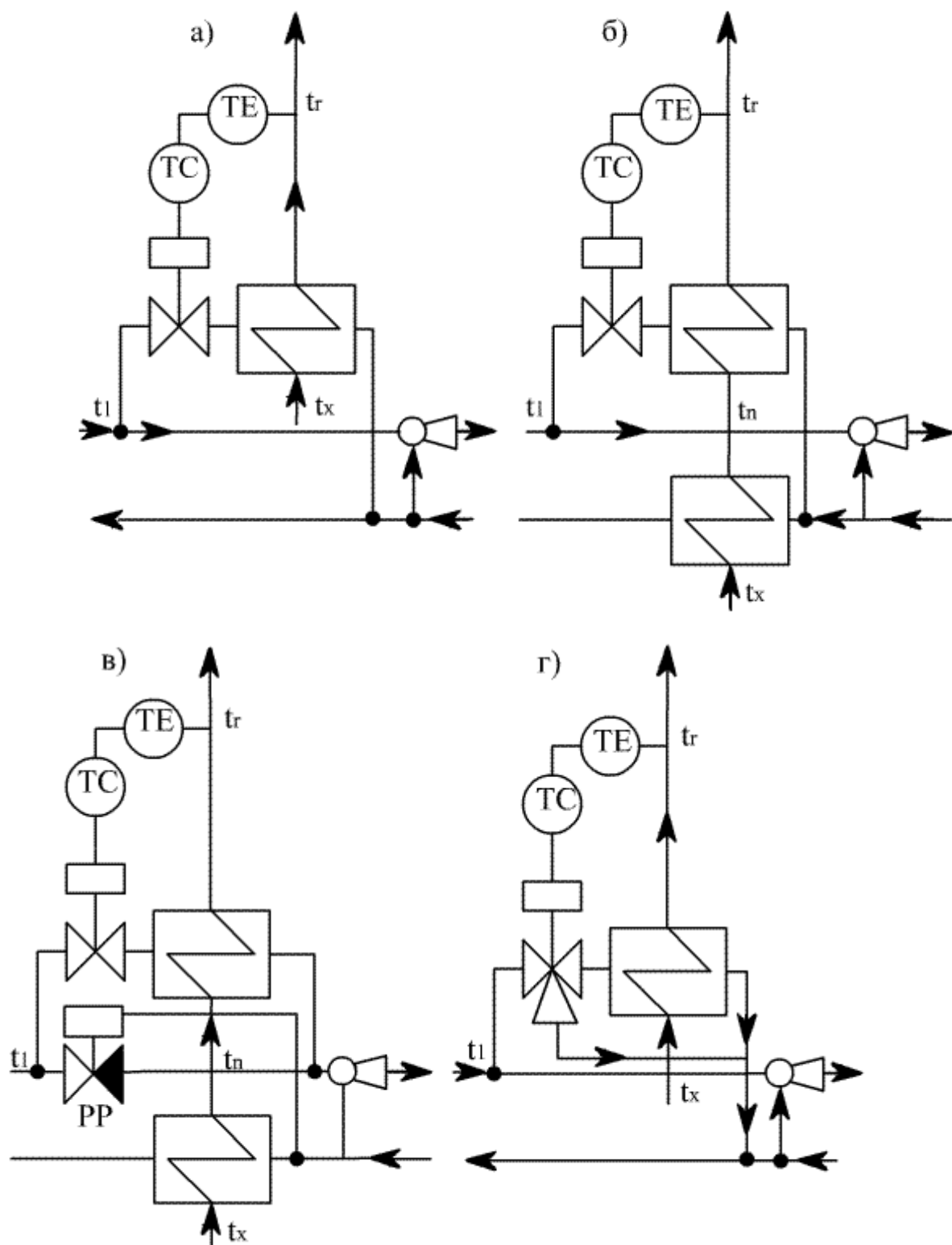


Рисунок 9.5 - Схемы автоматического регулирования температуры воды горячего водоснабжения при закрытой системе теплоснабжения: а - параллельная; б - смешанная двухступенчатая; в - двухступенчатая последовательная; г - схема с трехходовым регулирующим клапаном; TC - регулятор температуры; PP - регулятор расхода.

При таком способе регулирования обеспечивается примерно постоянный расход сетевой воды, что исключает полностью или частично гидравлическую разрегулировку тепловой сети.

При открытой системе теплоснабжения на узлах горячего водоснабжения отсутствуют водоводяные подогреватели; горячая вода к потребителю поступает непосредственно из тепловой сети. Температура воды, поступающей в систему горячего водоснабжения, регулируется смешением потоков воды из подающего и обратного трубопроводов тепловой сети.

Широкое распространение получили схемы с установкой регулирующего клапана на падающем трубопроводе и обратного клапана на обратном трубопроводе (рис. 9.6,а) и с применением трехходового клапана смещения (рис. 9.6,б).

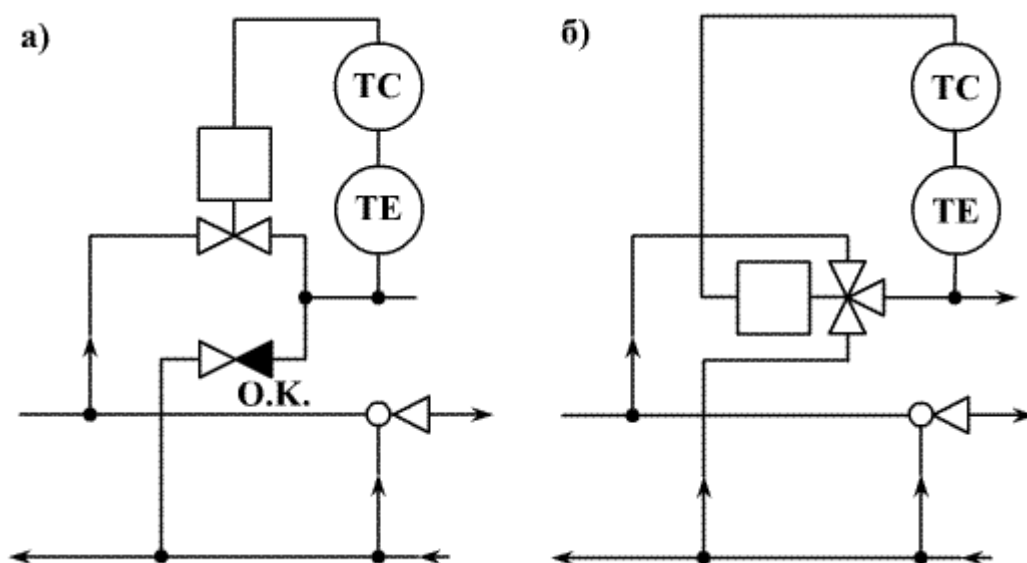


Рисунок 9.6 - Схемы автоматического регулирования температуры воды горячего водоснабжения при открытой системе теплоснабжения с двухходовым (а) и с трехходовым регулирующим клапаном (б)

Режим работы систем горячего водоснабжения отличается значительной неравномерностью расхода воды в течение суток, причем расход сетевой воды изменяется не только в течение суток, но и в течение

года. Например, в системе горячего водоснабжения с параллельной схемой включения подогревателей при увеличении температуры воды в подающем трубопроводе тепловой сети с 70 до 150°С расход сетевой воды на горячее водоснабжение уменьшается примерно в 3,5 раза. При непосредственном водоразборе в открытых системах теплоснабжения увеличение температуры воды в подающем трубопроводе приводит к некоторому снижению ее расхода.

9.5 Автоматическое регулирование барабанных паровых котлов

Принципиальная схема технологического процесса, протекающего в барабанном паровом котле, показана на рис. 9.7, схема циркуляционного контура - на рис. 9.8.

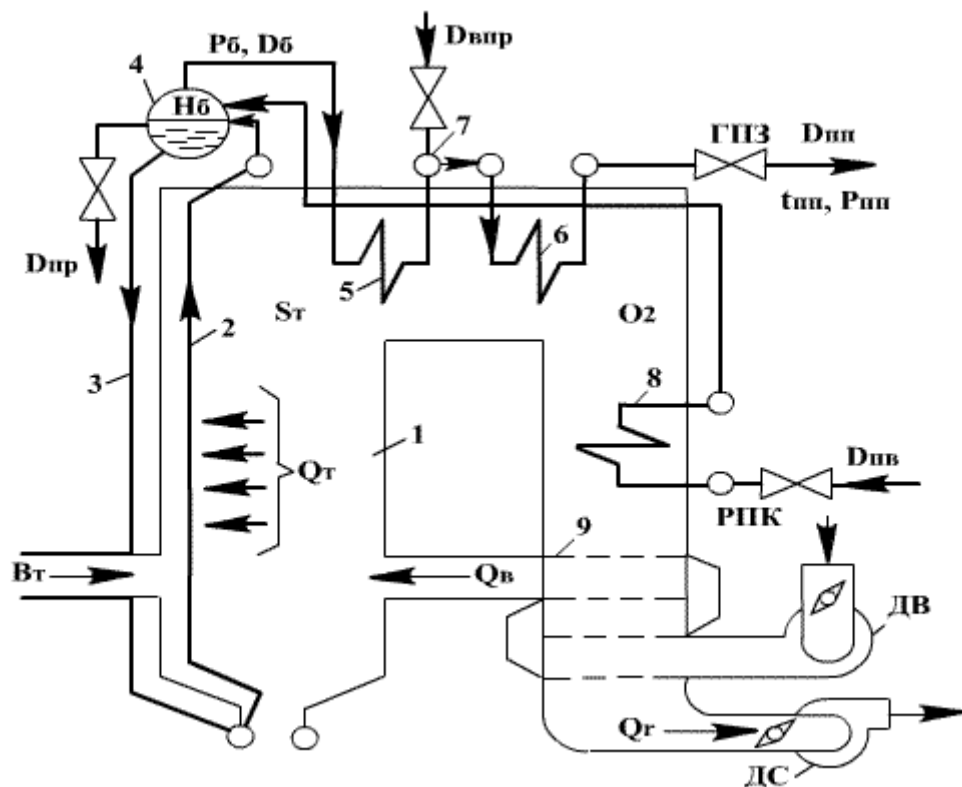


Рисунок 9.7 - Принципиальная технологическая схема барабанного котла.

где ГПЗ - главная паровая задвижка; РПК - регулирующий питательный клапан.

Топливо поступает через горелочные устройства в топку 1, где сжигается обычно факельным способом. Для поддержания процесса горения в топку подается воздух в количестве Q_B , с помощью вентилятора D_B . Воздух предварительно нагревается в воздухоподогревателе 9. Дымовые газы Q_T отсасывается из топки дымососом D_C . Дымовые газы проходят через поверхности нагрева пароперегревателей 5, 6, водяного экономайзера 8, воздухоподогревателя 9 и удаляются через дымовую трубу в атмосферу. Процесс парообразования протекает в подъемных трубах циркуляционного контура 2, экранирующих камерную топку и снабжаемых водой из опускных труб 3. Насыщенный пар D_6 из барабана 4 поступает в пароподогреватель, где нагревается до установленной температуры за счет радиации факела и конвективного обогрева топочными газами. При этом температура перегрева пара регулируется в пароохладителе 7 с помощью выпрыска воды $D_{впр}$.

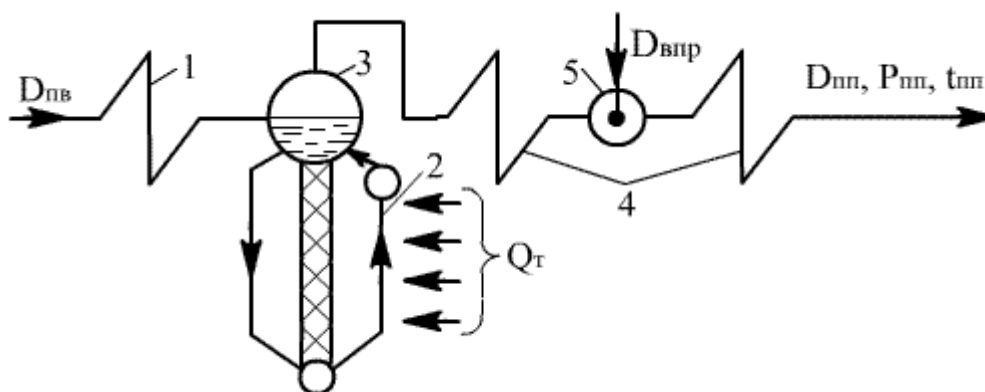


Рисунок 9.8 Принципиальные схемы барабанного котла: где 1-водяной экономайзер; 2-испарительная часть; 3-барабан; 4-ступени пароперегревателя; 5-пароохладитель.

Основными регулируемыми величинами котла является расход перегретого пара $D_{пп}$, его давление $P_{пп}$ и температура $T_{пп}$

Кроме того, следует поддерживать в пределах допустимых отклонений значения следующих величин:

- уровня воды в барабане – H_6 – регулируется изменением подачи питательной воды $D_{пв}$;

- разрежение в верхней части топки S_T – регулируется изменением производительности дымососов;
- оптимального избытка воздуха за пароперегревателем O_2 – регулируется изменением производительности дутьевых вентиляторов;
- солесодержания котловой воды $NaCl$ – регулируется изменением расхода воды $D_{пр}$, выпускаемой из барабана в расширитель непрерывной продувки.

Перечисленные величины изменяются в результате регулирующих воздействий и под действием внешних и внутренних возмущений. Котел как объект управления (ОУ) представляет собой сложную динамическую систему с несколькими взаимосвязанными входными и выходными величинами (рис. 9.9).

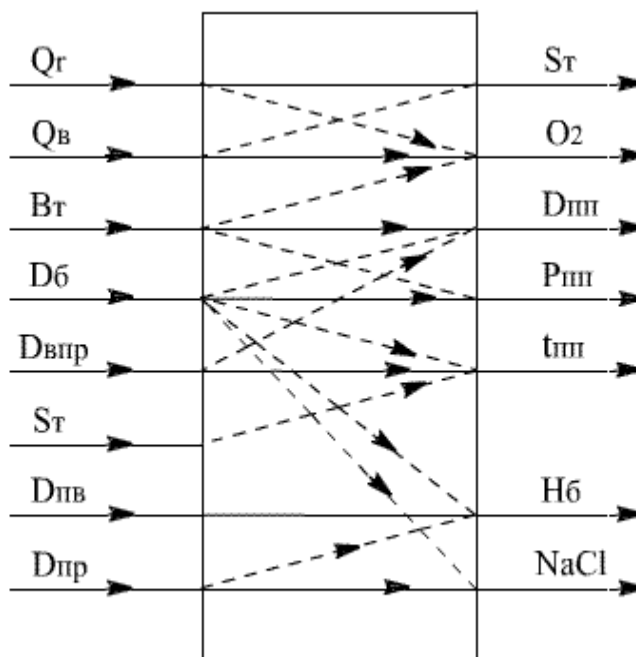


Рисунок 9.9 - Схемы регулирования температуры сетевой воды за подогревателями дросселированием греющего пара (а), перепуском части воды в обводах подогревателя с помощью регулирующего клапана на обводной линии (б) с помощью трехходового регулирующего клапана (в).

Система управления барабанным котлом (БПК) включает автономные:

- САР процессов горения и парообразования;
- САР температур перегрева пара;
- САР процессов питания и водного режима.

9.6 Автоматическое регулирование процессов горения и парообразования

Регулирование процесса горения и парообразования осуществляется следующим образом.

Процессы горения и парообразования тесно связаны. Количество сжигаемого топлива в установившемся режиме должно соответствовать количеству вырабатываемого пара D_6 . (Косвенным показателем тепловыделения Q'_T служит тепловая нагрузка Dq). Количество пара в свою очередь должно соответствовать расходу пара на турбину $D_{шт}$. Косвенными показателем этого соответствия служит давление пара перед турбиной. Регулирование процессов горения и парообразования в целом сводится к поддержанию вблизи заданных значений следующих величин:

- 1) давления перегретого пара $p_{шт}$ и тепловой нагрузки Dq
- 2) избытка воздуха в топке (содержания O_2 , %) за пароперегревателем, влияющего на экономичность процесса горения
- 3) разрежения в верхней части топки S_T

1. Регулирование давления перегретого пара и тепловой нагрузки. Котел как объект регулирования давления и тепловой нагрузки может быть представлен в виде простых участков, топочной камеры; парообразующей части, состоящей из поверхностей нагрева, расположенных в топочной камере; барабана и пароперегревателя (см. рис. 9.7)

Изменение тепловыделений Q'_T приводит к изменению паропроизводительности D_6 и давления пара в барабане P_6

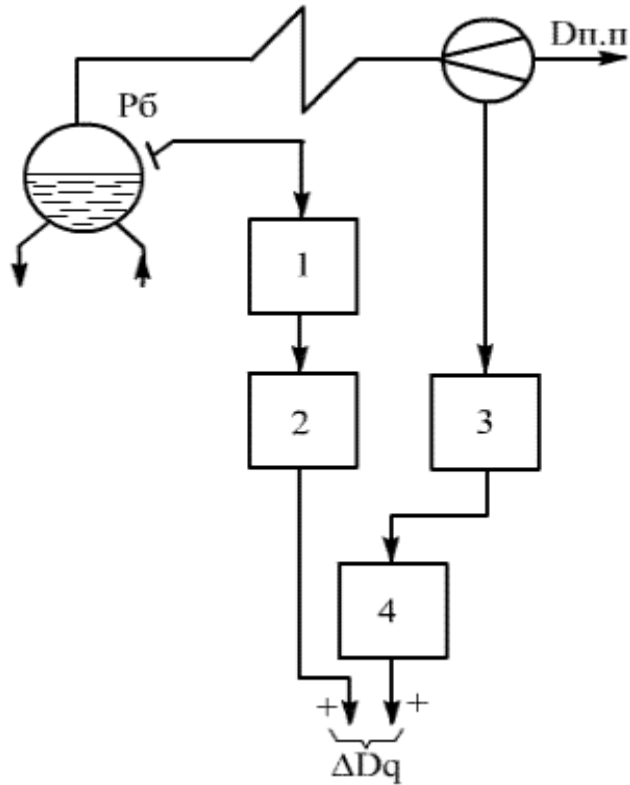


Рисунок 9.10 - Формирование сигнала по теплоте
 1 - датчик давления пара; 2 - дифференциатор; 3 - датчик расходомера пара; 4 - измерительный блок регулирующего прибора

Существующие способы и схемы автоматического регулирования тепловой нагрузки и давления пара в магистрали основаны на принципах регулирования по отклонению (базовой режим) и возмущению (регулирующей режим)

Базовым называют режим поддержания паровой нагрузки котла на заданном уровне вне зависимости от изменения общей электрической или тепловой нагрузки ТЭС.

В **регулирующем** режиме котел воспринимает колебания тепловой и электрической нагрузок турбин. Регулирования давления пара регулирующем режиме является воздействие на расход топлива, подаваемого в топку, в зависимости от отклонения давления пара в магистрали.

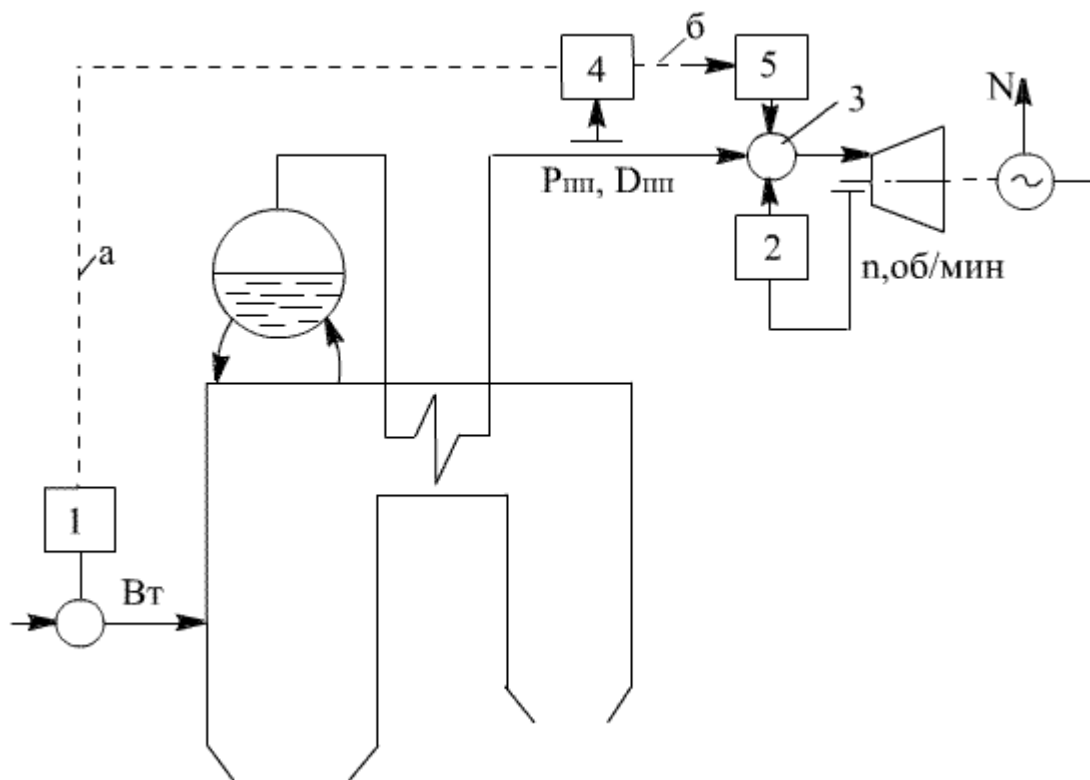


Рисунок 9.11 - Принципиальная схема регулирования давления пара перед турбиной

В *регулирующем* режиме давления пара поддерживает регулятор давления 4, воздействующий на регулятор подачи топлива в топку 1, а частота вращения ротора турбины – регулятор частоты вращения 2 (вариант а). В *базовом* режиме воздействие регулятора давления 4 должно быть переключено на механизм управления регулирующими клапанами турбины 3 через электропривод синхронизатора турбины 5 (вариант б).

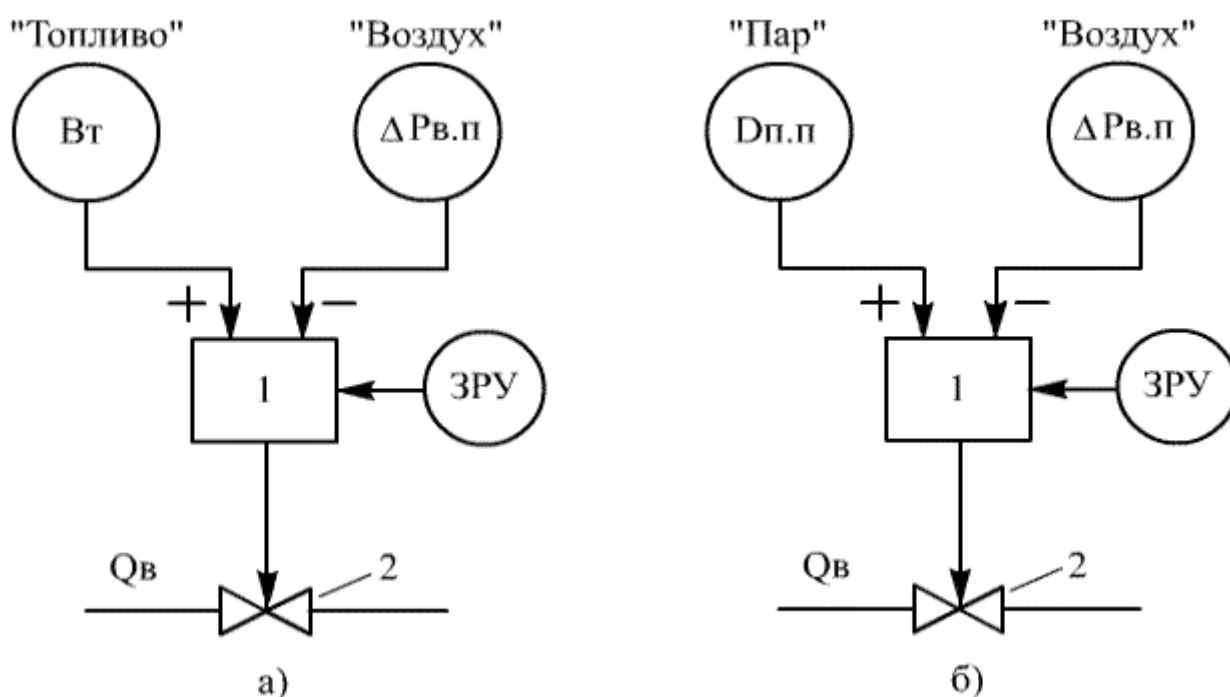
Поддержания постоянства давления пара в общей магистрали группы котлов обеспечивается при отклонение давления в общей магистрали подачей заданного количества топлива в топку каждого котла.

2. Регулирование экономичности процесса горения. Экономичность работы котла оценивается по его КПД, равному отношению полезной теплоты, затраченной на генерирование и перегрева пара, к располагаемой теплоте, которая могла быть получена при сжигании всего топлива. Поддержание оптимального избытка воздуха не только повышает КПД, но и уменьшает коррозии поверхности нагрева, образования вредных соединений и др.

Одним из наиболее представительных косвенных способов оценки экономичности процесса горения является анализ состава топочных газов, покидающих топку.

Способы и схемы регулирования. Основным способом регулирования оптимального значения избытки воздуха за пароперегревателем служит изменение количества воздуха, подаваемого в топку с помощью дутьевых вентиляторов (Дв). Существует несколько вариантов схема АУ подачи воздуха в зависимости от способов косвенной оценки экономичности процесса горения по соотношению различных сигналов.

а) Регулирования экономичности по соотношению **топливо- воздух**. При постоянном качестве топлива его расход и количество воздуха, необходимое для обеспечения требуемой полноты сгорания, связаны прямой пропорциональной зависимостью, устанавливаемой в результате режимных испытаний. При газообразном топливе требуемое соотношение между количеством газа и воздуха осуществляется наиболее просто. Однако непрерывное измерение расхода пылевидного твердого топлива является трудной проблемой. Поэтому применение схема **топливо-воздух** оправдано жидкого или газообразного топлива постоянного состава (рис. 9.11,а).



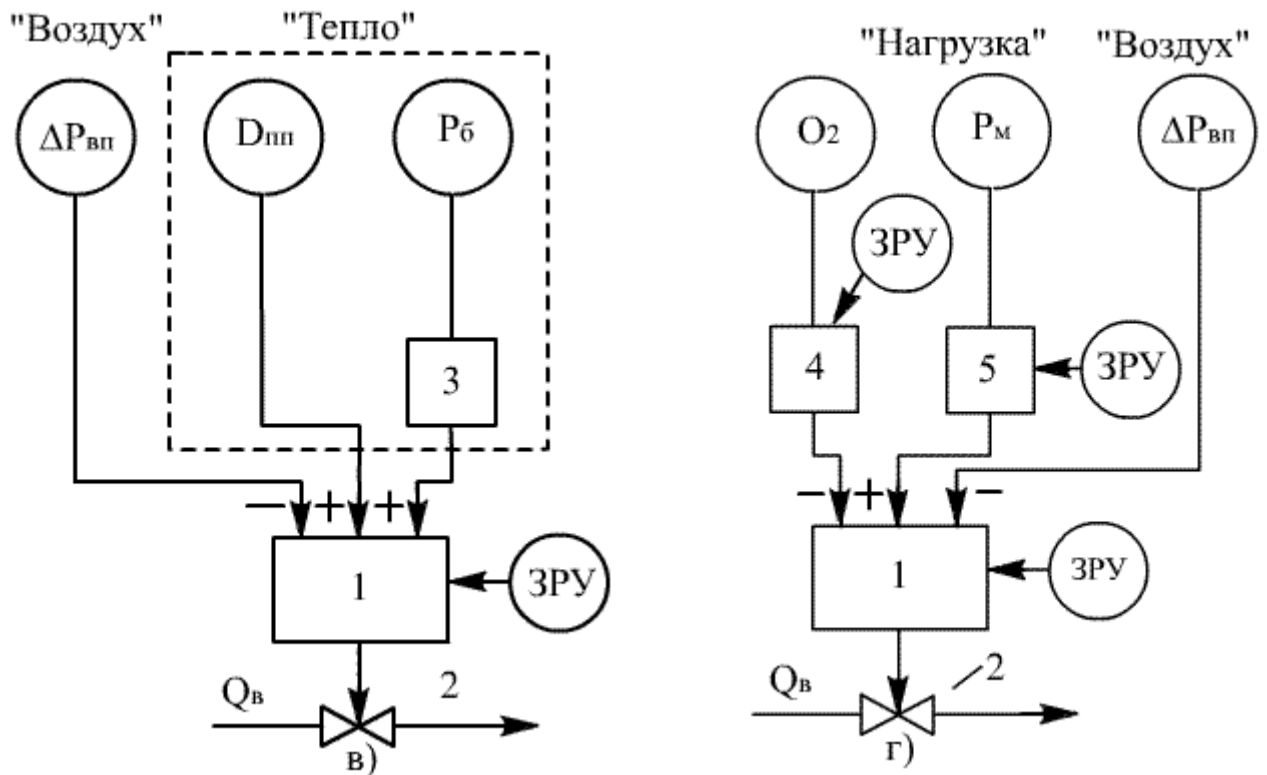


Рисунок 9.12 - Регулирование подачи воздуха по соотношению где а - топливо-воздух; б - пар-воздух; в - теплота-воздух; г - нагрузка-воздух с коррекцией по O_2 ; 1-регулятор подачи воздуха; 2-регулирующий орган; 3-дифференциатор; 4-корректирующий регулятор воздуха; 5-корректирующий регулятор давления перегретого пара (регулятор задания по нагрузке).

б) Регулирования экономичности по соотношению **пар-воздух**. На единицу расхода различного по составу топлива необходимо различное количество воздуха. На единицу теплоты, выделяющейся при сгорании любого вида топлива, требуется одно и то же количество воздуха. Поэтому если оценивать тепловыделение в топке по расходу пара и изменять расход пара, то тем самым можно поддерживать оптимальный избыток воздуха (рис. 9.12,б).

в) Регулирования экономичности по соотношению **теплота-воздух**. Если тепловыделение в топке $Q'_т$ оценивать по расходу перегретого пара и скорости изменения давления пара в барабане, то инерционность этого суммарного сигнала при топочных возмущениях будет существенно меньше

инерционности одного сигнала по расходу пара $D_{\text{шт}}$. Соответствующее заданному тепловыделению количество воздуха измеряется по перепаду давлений на воздухоподогревателе или по давлению воздуха в напорном патрубке вентилятора. Разность этих сигналов используется в качестве входного сигнала регулятора экономичности (рис. 9.12,в).

г) Регулирования экономичности по соотношению **задание-воздух (нагрузки-воздух)** с коррекцией O_2 . Содержание O_2 в продуктах сгорания топлива характеризует избыток воздуха и слабо зависит от состава топлива. Поэтому использование O_2 в качестве входного сигнала автоматического регулятора, воздействующего на расход воздуха, представляется вполне целесообразным. Однако реализация этого способа затруднена из-за отсутствия надежности и быстродействующих газоанализаторов кислорода. В схем **задание-воздух** с дополнительной коррекцией по O_2 в целом совмещаются принцип регулирования по возмущению и отклонению (рис. 9.12,г). Регулятор подачи воздуха 1 изменяет его расход по сигналу от главного или корректирующего регулятора давления 5, являющегося автоматическим датчиком регуляторов по нагрузке котла. Сигнал, пропорциональный расходу воздуха, действует, как и в других схемах: во-первых, устраняет возмущение по расходу воздуха, не связанные с регулированием экономичности; во-вторых, способствует стабилизации самого процесса регулирования подачи воздуха, т.к. служит одновременно сигналом жесткий отрицательной обратной связи. Дополнительный сигнал по содержания O_2 повышает точность поддержания оптимального избытка воздуха.

Способы «теплота- воздух», «пар-воздух» отличается простотой и надежностью но не является точными.

3. Регулирование разрежения в топке. Наличие небольшого (до 20-30 Па) постоянного разрежения S_T в верхней части топки необходимо по условиям нормального топочного режима. Объект регулирования по разрежению представляют собой топочную камеру с включенными

последовательно с нею газоходами от поворотной камеры до всасывающих патрубков дымососов. Входным регулирующим воздействием этого участка служит расход дымовых газов, определяемый производительностью дымососов. К внешним возмущающим воздействиям относится изменение расхода воздуха в зависимости от тепловой нагрузки агрегата, к внутренним – нарушения газовоздушного режима, связанные с работой систем пылеприготовления, операциями по удалению шлака и т.п.

Способы и схемы регулирования. Регулирование разрежения обычно осуществляется посредством изменения количества уходящих газов, отсасываемых дымососами. Наиболее распространение получила схема регулирования разрежения с одноимпульсным ПИ-регулятором, реализующая принцип регулирования по отклонению (рис. 10.7,б). Требуемое значение регулируемой величины устанавливается с помощью ручного задатчика ЗРУ регулятора разрежения 1. При работе котла регулирующем режиме могут происходить частые изменения тепловой нагрузки и, следовательно, изменения расхода воздуха. Работа регулятора воздуха 2 приводит к временному нарушению материального баланса между поступающим воздухом и уходящими газами.

Для предупреждения этого нарушения и увеличения быстродействия регулятора разрежения рекомендуется ввести на его вход дополнительное исчезающее воздействие от регулятора воздуха через устройство динамической связи 3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Емельянов А.Н., Капник О.В. Проектирование систем автоматизации технологических процессов. Справочное пособие. 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоиздат, 1983. - 400 с.
2. Ключев А.С. и др. Настройка средств автоматизации и автоматических систем регулирования. Справочное пособие. 2-е изд. – М.: Энергоиздат, 1988. - 488 с.
3. Ключев А.С. Проектирование систем автоматизации технологических процессов. Справочное пособие. 2-е изд. - М: Энергоиздат, 1990. - 464 с.
4. Мамиконов А.Г. Проектирование АСУ. Учебник для вузов. - М.: Высшая школа, 1987. - 303 с.
5. Романычева Э.Т. и др. Автоматизация разработки и выполнения конструкторской документации. /Учеб. пособие. - М.: Высшая школа, 1990. - 176 с.
6. Системы автоматизированного проектирования. Учеб. пособие для вузов. / Под ред. И.Н. Норенкова. - М.: Высшая школа, 1986. - 242с.
7. Техника чтения схем автоматического управления и технологического контроля / Ключев А.С., Глазов Б.В., Миндин М.Б. Под ред. А.С. Ключева. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1991. 432 с.

Дополнительная литература

1. Трегуб В.Г., Ладанюк А.П., Плужников Л.Н. Проектирование, монтаж и эксплуатация систем автоматизации в пищевой промышленности. Учебник для вузов. - М.: Агропромиздат, 1991. – 352 с.
2. Настройка средств автоматизации и автоматических систем регулирования. Справочное пособие. 2-е изд., перераб. и доп.- М: Энергоиздат, 1989. - 368 с.
3. Монтаж приборов и средств автоматизации. Справочник. /Под ред. А.С. Ключева. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергия, 1979. – 728 с.
4. Настройка средств измерений и систем технологического контроля. Справочное пособие./ Под ред. А.С. Ключева. 2-е изд., перераб. и доп. - М: Энергоиздат, 1990. - 400 с.
5. Е.А. Каминский. Практические приемы чтения схем электроустановок. - М.: Энергоиздат, 1988. - 368 с.

Лукина Галина Владимировна

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Методическое пособие

для самостоятельной работы студентов высших учебных заведений по специальности 110302.65 «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства», 140106.65 – «Энергообеспечение предприятий».

Подписано в печать 28.04.09
формат 60x84/16
печ. л. 11
тираж 100экз
федеральное государственное
образовательное учреждение
высшего профессионального
образования «Иркутская
государственная
сельскохозяйственная академия»

Отпечатано в типографии ИрГСХА
664038, г. Иркутск, пос. Молодежный.
Лицензия на полиграфическую
деятельность ЛР №07444
от 11.03.98г.