

**Дальневосточный государственный технический университет
(ДВПИ им. Куйбышева)**

Г.А. Липатников, М.С. Гузеев

Автоматическое регулирование объектов теплоэнергетики

Учебное пособие

**Рекомендовано Дальневосточным региональным учебно-методическим
пособием в качестве учебного пособия для студентов направления 650800
«Теплоэнергетика» вузов региона**

**Владивосток
2007**

УДК 621.311.22:681.5(075.32)

Липатников Г.А., Гузеев М.С. Автоматическое регулирование объектов теплоэнергетики.

В книге приведены краткие сведения по теории автоматического регулирования, методам математического моделирования объектов и систем регулирования объектов теплоэнергетики. Дано описание современных средств автоматизации, применяемых законов регулирования и их реализации. Приведены схемы автоматического регулирования и защиты основного и вспомогательного оборудования тепловых электростанций, в том числе при блочной ее компоновке, а также отопительных и производственных котельных, дано описание их работы.

Учебное пособие предназначено для студентов энергетических специальностей вузов, техникумов и колледжей.

Рецензенты: **А.Г. Резник**, к.т.н. профессор МГУ
им. Г.И. Невельского.
В.В. Слесаренко, д.т.н. профессор
ДВГТУ.

Предисловие

Применение новых форм и методов обучения в высших учебных заведениях, в частности, дистанционного обучения предопределило необходимость создания и совершенствования учебно-методической и лабораторной базы кафедр вузов, в том числе написание и собственного издания учебной и учебно-методической литературы. При этом ее содержание должно отражать подход в формировании целей и задач в подготовке специалистов, требований к уровню и объему знаний по специальности.

В предложенном издании учебного пособия для студентов теплоэнергетических специальностей кратко изложены основные сведения по теории автоматического регулирования и математическому моделированию объектов теплоэнергетики. Приведены схемы систем регулирования и защит котлоагрегатов современных ТЭС, отопительных и производственных котельных, средств автоматизации технологических процессов.

Значительное влияние уделено вопросам регулирования турбин различного назначения, в том числе локальных систем регулирования и защит. При этом для теплофикационных турбин изложены понятия автономности регулирования. Показаны также элементы систем регулирования турбин, их конструкции и характеристики.

Дано описание программ управления энергоблоком, рассматривая его как единый объект регулирования с общей многосвязанной системой управления.

Главы 1-15, 17-21 написаны Г.А. Липатниковым, глава 16 подготовлена М.С. Гузеевым.

Введение

Автоматическое регулирование объектов теплоэнергетики это отрасль науки и техники, охватывающая теорию и принципы построения систем управления технологическим процессом без непосредственного участия человека. Если прежде в ранней стадии становления энергетики под автоматическим регулированием понималось выполнение определенных, часто повторяющихся действий без участия персонала, обслуживающего энергетические объекты, то в настоящее время преобладающую роль играет схемы и технические средства, обеспечивающие организацию и оптимизацию технологических процессов, автоматизацию управления ими.

Для развития энергетической исключительное значение имеет теоретические и экспериментальные исследования в области физического и математического моделирования. Разработаны теория и принципы построения моделей энергооборудования, их систем регулирования, посредством которых стало возможным моделирование процессов в крупных энергосистемах.

Широкая автоматизация технологических процессов нашла свое яркое отражение в развитии в развитии комплексной автоматизации электростанций, разнообразного применения телемеханических устройств в энергосистемах, в частности в диспетчерском управлении режимами работы электростанций и энергосистем в целом.

Регулирование технологических процессов в энергетике, происходящих при экспериментальных температурах и скоростях требует аппаратуры высокого класса, обладающей быстротой и точностью действия. Вместе с тем внедрение электронных полупроводниковых устройств и интегральных микросхем в системах управления не исключает механических, гидравлических, пневматических и электромеханических элементов и систем.

Применение автоматических систем регулирования позволяет повысить надежность и экономичность работы энергооборудования электростанций при малом числе обслуживающего персонала. Учитывая, что на эти показатели оказывает влияние большое количество взаимосвязанных факторов, для оценки эффективности работы энергоустановок используется вычислительная техника, обеспечивающая автоматический сбор необходимой информации и расчет технико-экономических показателей электростанций и энергосистем. Подсистемы контроля, управления и расчета технико-экономических показателей образуют автоматизированную систему управления технологическими процессами тепловой электростанции.

ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ В ТЕОРИИ И ПРАКТИКЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Основная задача автоматического регулирования энергетической установки - обеспечить ее работу во всей области гарантированных режимов. Режимы работы различных энергоустановок характеризуются значениями одной или несколькими величин. Так, режимы работы парового котла характеризуются давлением и температурой пара при выходе из котла, его паропроизводительностью. Режим работы турбины - частотой вращения ротора турбины и напряжением на клеммах генератора для конденсационного турбогенератора, для турбин с отборами пара для потребителя еще и давлением пара в отборах-теплофикационном или производственном. Те параметры режима работы энергоустановки, которые регламентируются внешним потребителем, называются внешними регулируемыми параметрами, остальные внутренними. Для турбогенератора внешними являются частота вращения ротора, напряжение на клеммах генератора и давление в отборах пара к потребителю. Для котельной установки - давление, температура и расход свежего пара. Внутренние регулируемые параметры в большинстве своем относятся к параметрам, определяющим регламентное состояние и работу вспомогательного оборудования электростанций.

Если в процессе работы энергоустановки регулируемые величины существенно отклоняются от требуемых (нормируемых) значений, то в работу вступают регулировочные органы энергоустановки, изменяя в необходимом направлении значения этих величин. В таком случае энергоустановка становится объектом управления в широком смысле или объектом регулирования, например, по одному внешнему параметру регулирования.

Для того, чтобы была обеспечена нормальная работа объекта регулирования (ОР) во всей области гарантированных режимов, он должен обладать определенной статической характеристикой, которая связывает режимные параметры энергоустановок в равновесных процессах, последняя может быть выражена аналитической или графической зависимостью регулируемой величины от нагрузки.

Например: $n=f(P_n)$ или $\omega=f(N_T)$,

где P_n - нагрузка турбогенератора, N_T - электрическая мощность турбогенератора, n - число оборотов ротора турбины, ω - его угловая скорость вращения.

$P=f(D_p)$ - давление пара при выходе из котла, D_p - расход пара, $t_{пп} = f(D_p)$ - температура свежего пара.

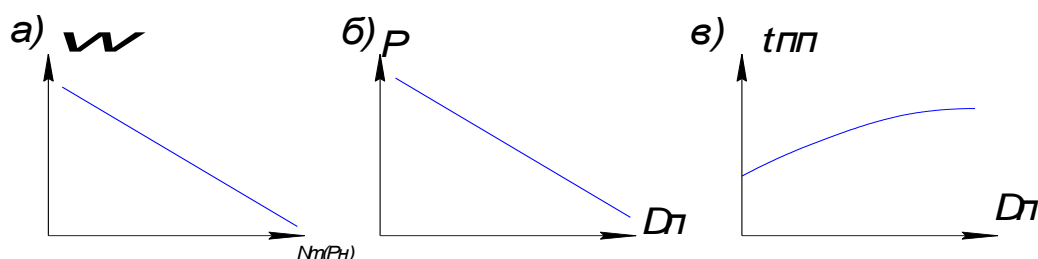


Рис. 1.1 Статические характеристики объекта регулирования.

а) турбины по скорости вращения ротора, б), в) котла по давлению и температуре пара.

Естественная характеристика ОР зачастую может не удовлетворять потребителя. Чтобы привести ее в соответствие с требованиями потребителя применяется система регулирования, которая позволяет получить надлежащую статическую характеристику ОР. Система регулирования может состоять из нескольких элементов, каждый из которых имеет свою статическую характеристику.

Статическая характеристика ОР может быть получена на основании статических характеристик элементов, входящих в состав системы регулирования. Таким образом,

статическая характеристика ОР является результирующей, поскольку, влияя на статические характеристики элементов системы регулирования, можно получить приемлемую для потребителя статическую характеристику ОР. Задача нахождения требуемой статической характеристики относится к статике регулирования - регулированию в установившихся (равновесных) процессах.

Режимы работы ОР и их систем регулирования называются равновесными или установившимися, если регулируемая величина и все действующие в системе возмущения не изменяются во времени. Так, установившееся движение турбогенератора возможно при равенстве момента движущих сил M_T , развиваемых паром или газом на лопатках турбины, и момента сил сопротивления - электромагнитных сил генератора M_G , т.е. $M_{m0} = M_{e0} = M_0$. В действительности момент сил сопротивления, зависящий от потребителя (электросети), в процессе работы турбогенератора может изменяться, вследствие чего равновесие в силовом поле взаимодействующих сил нарушается, и ротор турбогенератора получает ускорение или замедление, из-за чего равновесный режим нарушается.

При неустановившемся (неравновесном) режиме в действие приходит система регулирования. Связи между элементами системы регулирования и объектом регулирования в переходных процессах называются динамическим направленным действием. Они определяют характер переходных процессов в системе. Задача системы регулирования – перевести ОР в такой режим, который соответствует равновесному состоянию системы. Изучение переходных процессов составляет вторую основную задачу автоматического регулирования и относится к динамике регулирования.

Первым шагом при изучении динамики регулирования должно быть разграничение систем годных от систем не годных для целей управления объектом. Такое разграничение выполняется путем исследования устойчивости систем регулирования. Система регулирования называется устойчивой, если будучи выведенной из состояния равновесия сообщением ей некоторых начальных отклонений в своем дальнейшем движении будет стремиться к некоторому равновесному состоянию. Регулирование, не удовлетворяющее этому условию, называется неустойчивым. Исследование устойчивости регулирования имеет целью дать качественную оценку той или иной принципиальной схеме регулирования, то есть установить правильно ли будет функционировать данная система регулирования при каких-либо нарушениях равновесного режима или нет.

В исследованиях динамических процессов регулирования, предполагают, что к ОР или регулятору приложены некоторые воздействия. Их называют соответственно: возмущающими и управляющими.

В зависимости от характера связей системы регулирования делятся на системы работающие по:

- 1) замкнутому циклу (Рис. 1.2)

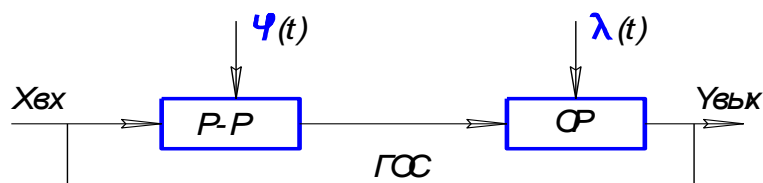


Рис. 1.2 Схема замкнутого регулирования

$P-P$ - регулятор, OP - объект регулирования, ГОС – главная обратная связь, $\varphi(t)$ - управляющее воздействие, $\lambda(t)$ - возмущающее воздействие, $y_{вых}$ - регулируемый параметр, $x_{вх}$ - входная величина отклонения регулируемого параметра.

- 2) разомкнутому циклу (Рис. 1.3.)



Рис. 1.3 Схема разомкнутого регулирования.

Наличие обратной связи между ОП и регулятором, которую называют главной, является необходимым условием автоматической системы регулирования (АСР), т.е. АСР это замкнутые динамические системы направленного действия.

В теплоэнергетике находят применение системы регулирования нескольких величин. При этом их регуляторы связаны вне ОП. Такие схемы называются системами связанного регулирования, например, АСР теплофикационных турбин.

Системы регулирования, где управляющее воздействие изменяется в зависимости от времени по заданному закону, носят название систем программного регулирования.

1.1 Структура АСР и ее основные элементы.

По виду используемой энергии различают АСР: механические, гидравлические, пневматические, электрические, комбинированные.

Регулятор, выполняя свои функции, должен перемещать регулировочные органы (РО) в требуемом направлении, для обеспечения устойчивого движения системы. При этом нередко для перестановки РО требуются затраты значительной мощности, которую не могут развить регуляторы. В таких случаях в составе АСР предусматривают усилительные устройства, которые включают в передаточный механизм между регулятором и РО. Усилители воспроизводят все указания от регулятора, и мощность сигнала от них должна быть достаточной для необходимого перемещения регулировочных органов. Автоматическое регулирование без участия усилителей называется прямым регулированием, а при наличии их в передаточном механизме - непрямым регулированием.

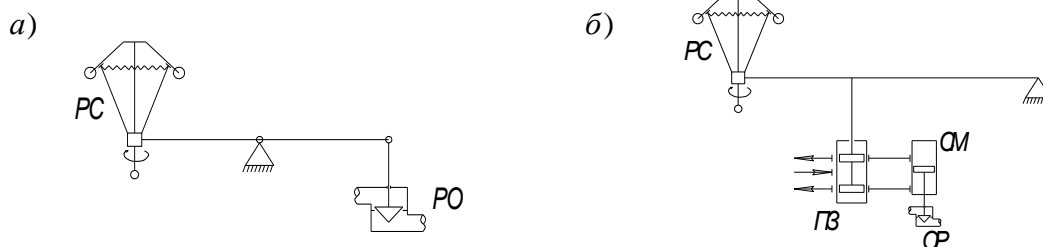


Рис. 1.4 Схема прямого (а) и непрямого регулирования (б) турбин.
 PC- регулятор скорости, ПЗ- промежуточный золотник, СМ-сервомотор, РО- регулировочные органы (клапаны) турбины.

АСР с использованием электрической энергии нашли широкое применение для котельного оборудования и вспомогательных установок на ТЭС (Рис. 1.5)

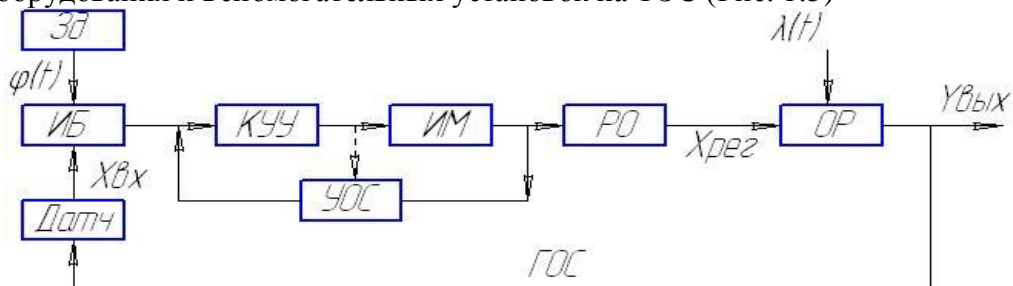


Рис 1.5 Схема электрической системы регулирования.

Д-датчик, в состав которого могут входить преобразователь энергии и чувствительный элемент: давления, температуры, расхода, других регулируемых величин;

ЗД-задатчик, с помощью которого устанавливают заданное значение регулируемого параметра.

УОС-устройство внутренней обратной связи, предназначенной для стабилизации процесса регулирования, его сигнал направлен навстречу $x_{вх}$;

ИБ-измерительный блок, производит алгебраическое суммирование сигналов, поступающих от датчика и задатчика;

КУУ-командно - усилительное устройство;

ИМ-исполнительный механизм.

Примером использования в АСР комбинированного вида энергии является система регулирования турбины, в которой установлен электрогидравлический преобразователь для преобразования электрического сигнала от регуляторов энергосистемы (корректора частоты, противоаварийной автоматики, регулятора обменной мощности) в гидравлический сигнал для гидравлической системы регулирования турбоагрегата.

1.2 Переходные процессы в АСР.

Нарушения равновесных режимов в АСР происходят под влиянием различных факторов, например, управляющего воздействия, направленного к регулятору от задатчика, или возмущающего воздействия приложенного к объекту регулирования. Системы регулирования ведут себя по отношению к этим воздействиям существенно различным образом. В то время как управляющее воздействие определяет величину и направление изменения регулируемого параметра, возмущающее воздействие не должно существенно влиять на изменение регулируемых параметров

Виды переходных процессов в АСР при единичных ступенчатых воздействиях $\varphi(t) = 1(t)$ и $\lambda(t) = 1(t)$ (Рис. 1.6)

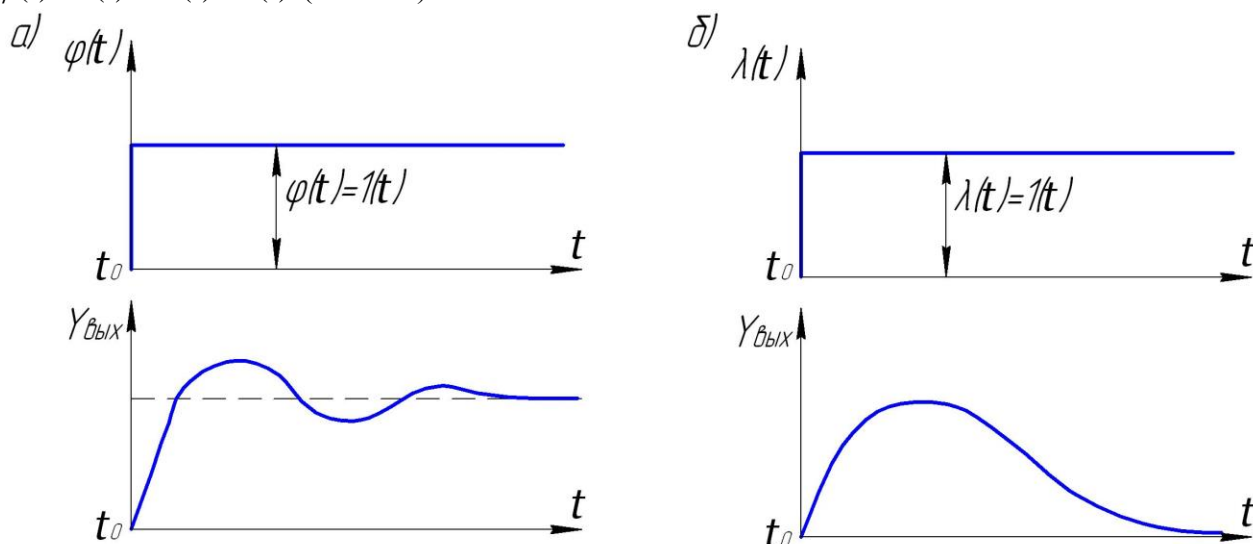


Рис. 1.6 Переходные процессы в устойчивых АСР.

а) – при управляющем воздействии, б) – при возмущающем воздействии.

Для устойчивых АСР переходные процессы сходящиеся, т.е. $y_{вых}$ стремится к заданному значению или возвращается к прежнему. В неустойчивых АСР переходные процессы расходящиеся: регулируемый параметр отклоняется от своего заданного значения на большую величину с возрастающей скоростью (Рис. 1.7,а)

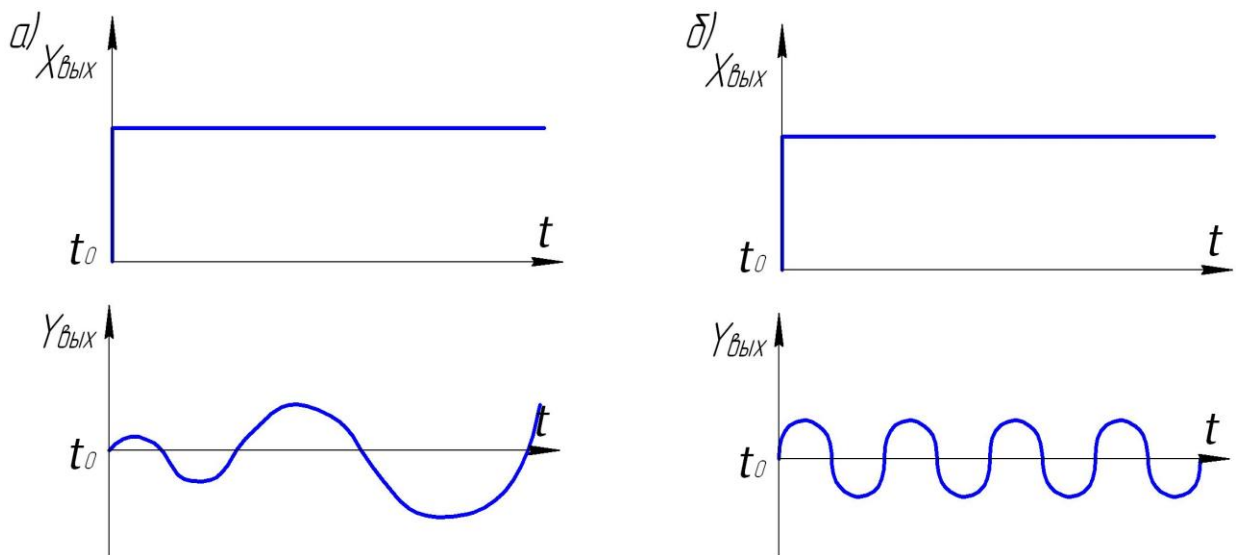


Рис. 1.7 Переходные процессы в АСР: а) неустойчивых, б) находящихся на границе устойчивости.

АСР может находиться на границе устойчивости, когда регулируемый параметр не принимает заданного значения и его отклонения имеет постоянную амплитуду отклонения от заданного значения (Рис. 1.7,б). При том или ином воздействии требуемые и действительные значения регулируемой величины могут отличаться друг от друга. Разность между заданным $Y_{вых}^{зд}$ и действительным значением регулируемой величины $y_{вых}$ называется ошибкой регулирования.

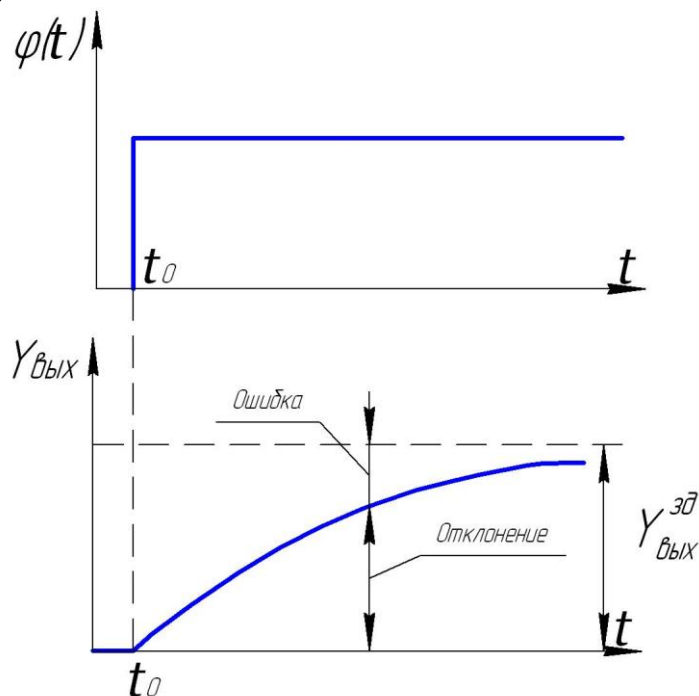


Рис. 1.8 Ошибки и отклонения для АСР.

Отклонением регулируемой величины называется разность между значением регулируемой величины в данный момент времени и некоторым фиксированным ее значением, принятым за начало отсчета. Различают динамическую ошибку и отклонение в переходных процессах и ошибку и отклонение в равновесных режимах - статическая ошибка, отклонение.

1.3 Статические и астатические системы регулирования.

Автоматические системы регулирования принято подразделять на статические и астатические в зависимости от того имеют ли они или не имеют отклонение или ошибку в установившемся состоянии при воздействиях, удовлетворяющих определенным условиям.

Система регулирования называется статической по отношению к возмущающему воздействию, если при воздействии, стремящемся с течением времени к некоторому установившемуся постоянному значению, отклонение регулируемой величины так же стремится к постоянному значению, зависящему от величины воздействия.

Система регулирования называется астатической по отношению к возмущающему воздействию, если при воздействии, стремящемся с течением времени к некоторому установившемуся постоянному значению, отклонение регулируемой величины стремится к нулю вне зависимости от величины воздействия.

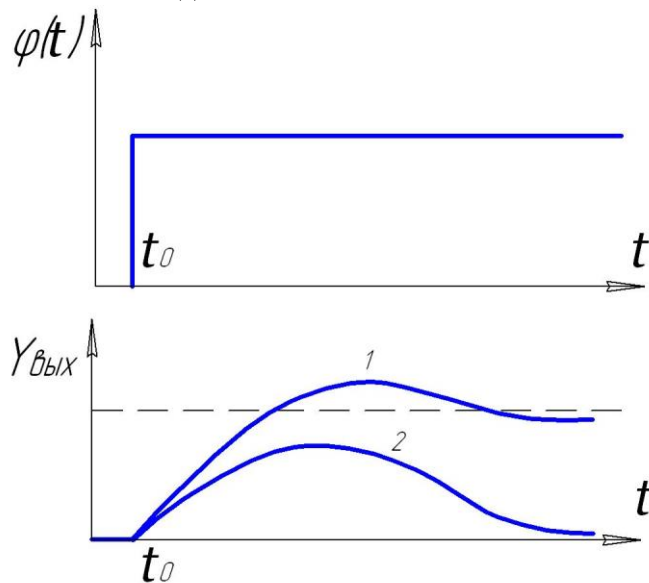


Рис. 1.9 Переходные процессы в статических (1) и астатических (2) АСР.

В статической системе регулирования статическая характеристика всегда изображается наклонной линией (Рис.1.10,а).

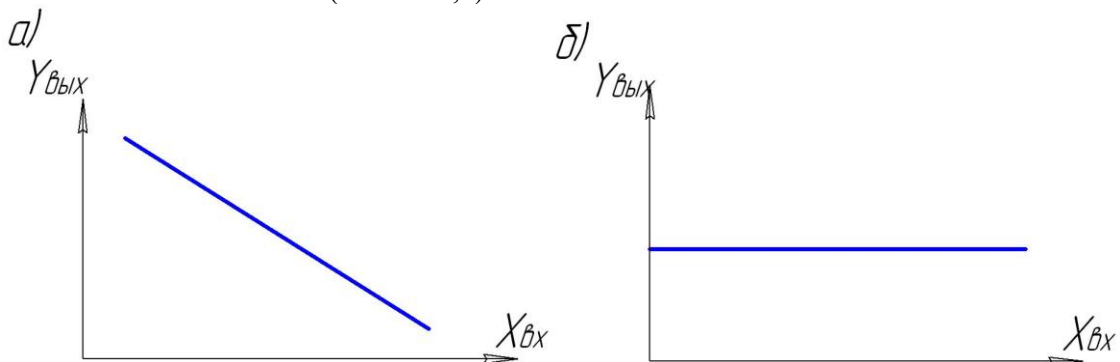


Рис. 1.10 Статические характеристики статической (а) и астатической (б) АСР

$X_{\text{вх}}$ - входное воздействие $Y_{\text{вых}}$ - выходной регулируемый параметр

Система регулирования называется статической по отношению к управляющему воздействию, если при воздействии, стремящемся с течением времени к некоторому установившемуся постоянному значению, ошибка так же стремится к постоянному значению, зависящему от величины воздействия. Система регулирования называется

астатической по отношению к управляющему воздействию, если при воздействии, стремящемся с течением времени к некоторому установившемуся постоянному значению, ошибка стремится к нулю вне зависимости от величины воздействия.

Для астатических систем регулирования статическая характеристика всегда изображается прямой, параллельной оси абсцисс (Рис. 1.10,б).

Следует подчеркнуть, что одна и та же система регулирования может быть астатической по отношению, например, какому-либо возмущающему воздействию и статической по отношению к управляющему воздействию и наоборот. Таковой, в частности, является автоматическая система регулирования давления свежего пара при выходе из котла.

1.4 Принципы автоматического регулирования.

Влияние возмущающих воздействий на регулируемую величину можно компенсировать или регулированием по возмущению или регулированием по отклонению регулируемой величины от ее заданного значения. (Рис. 1.11)

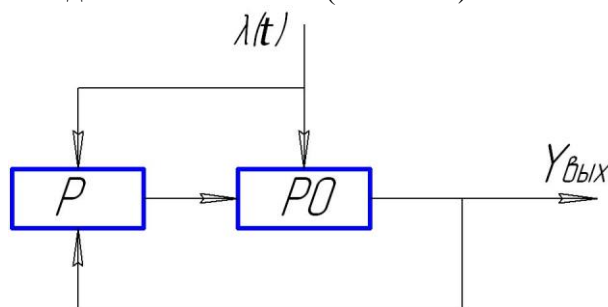


Рис. 1.11 Схема реализации принципов автоматического регулирования.
P- регулятор, OP- объект регулирования.

В первом случае работа АСР основана на контроле возмущающих воздействий. В этих системах воздействие на регулировочные органы ОР осуществляется почти без запаздывания по отношению к моменту возникновения возмущения, т.е. еще до того как успеет существенно измениться значение регулируемой величины. В этом достоинство систем. Недостатком такой системы является то, что флуктуации нагрузки (случайные возмущения) и неизбежные неточности в работе системы регулирования будут вызывать отклонения регулируемой величины, накапливающиеся со временем и зачастую выходящие за допустимые пределы.

При работе АСР по отклонению регулируемого параметра почти исключается возможность неоправданного срабатывания регулятора. Недостаток этих АСР в том, что регулирующее воздействие на объект регулирования будет лишь по мере накопления отклонения регулируемой величины и следовательно, будет запаздывать по отношению к событию возмущения. Сочетание достоинств с устранением недостатков этих систем возможно в комбинированной АСР, в которых воздействие на регулятор производится по возмущению (или по нескольким возмущениям) и по отклонению регулируемой величины от заданного значения. Примером такой системы является АСР питания барабанного котла.

Требования к АСР:

- 1) к запасу устойчивости (при том, что процессы регулирования должны быть сходящиеся);
- 2) к статической точности (величине допустимой ошибки регулирования в равновесном режиме);
- 3) к качеству переходного процесса (процессы должны быть не только сходящиеся, но и быстро затухающие);

- 4) к динамической точности - к величине ошибок (отклонений) в переходном процессе при наличии непрерывно изменяющихся воздействий.

ГЛАВА 2. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕКТОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Выбор элементного состава системы регулирования, законов регулирования, обеспечение требуемого качества процесса регулирования во многом определяется динамическими свойствами элементов АСР, и прежде всего объекта регулирования. Для определения динамических свойств ОР используют его динамические характеристики, к числу которых относят: разгонные характеристики, импульсные характеристики, частотные характеристики.

Динамические характеристики, как правило, определяются экспериментально. При невозможности получения экспериментальной характеристики пользуются методом математического моделирования АСР, описывая ее поведение дифференциальными уравнениями.

2.1 Разгонные характеристики объектов регулирования.

Разгонной или переходной характеристикой называют зависимость изменения выходной регулируемой величины от времени $u_{\text{вых}}(t)$. Для получения разгонной характеристики ОР ступенчатое воздействие может быть приложено к объекту регулирования или к регулятору.

Разгонные характеристики снимают при испытаниях или наладке в случаях, когда можно нанести значительные по величине и продолжительности во времени воздействия, достаточные для того, чтобы закончился переходный процесс, т.е. стабилизировался регулируемый параметр, по отношению к которому получают разгонную характеристику, либо стабилизировалась скорость его изменения.

Методика получения разгонных характеристик сводится к выполнению следующих основных условий:

- до нанесения воздействия стабилизируется режим работы ОР по регулируемому параметру, относительно которого снимается разгонная характеристика;
- размыкается главная обратная связь между ОР и регулятором, регулирующим параметр, по которому снимается разгонная характеристика;
- величина воздействия устанавливается исходя из производственных возможностей длительного нарушения режима работы ОР.

Необходимо, чтобы воздействие значительно превосходило по величине случайные возмущения, которые могут иметь место во время опыта (обычно воздействие составляет не менее 10% от максимально возможного). Воздействия наносят с возможно большой скоростью, приближаясь к ступенчатому. Во время опыта необходимо обеспечить, чтобы другие виды возмущений отсутствовали или, во всяком случае, были малы по сравнению с наносимым. В виду того, что сложные регулируемые объекты имеют различные динамические свойства при различных видах воздействий, разгонные характеристики снимают при управляющем $\varphi(t)$ и возмущающем $\lambda(t)$ воздействии, либо воздействию приложенном к исполнительному механизму регулировочного органа $x_{\text{pec}}(t)$. Опыт следует повторить, по крайней мере, два раза при воздействиях одного знака (направления) и затем направление (знак) изменить. Разгонная характеристика будет считаться полученной при

удовлетворительном совпадении результатов. Для нелинейных ОР опыт проводят при нескольких, обычно трех, различных нагрузках ОР.

Разгонная характеристика одноемкостного объекта регулирования с самовыравниванием. Способность объекта регулирования приходить после воздействия на него в новое установившееся состояние называется свойством самовыравнивания ОР.

У ОР с самовыравниванием каждому положению регулировочного органа или значению нагрузки (возмущающему воздействию) соответствует свое установившееся значение регулируемого параметра, согласно величине воздействия.

Разгонные характеристики приведены на рис. 2.1.

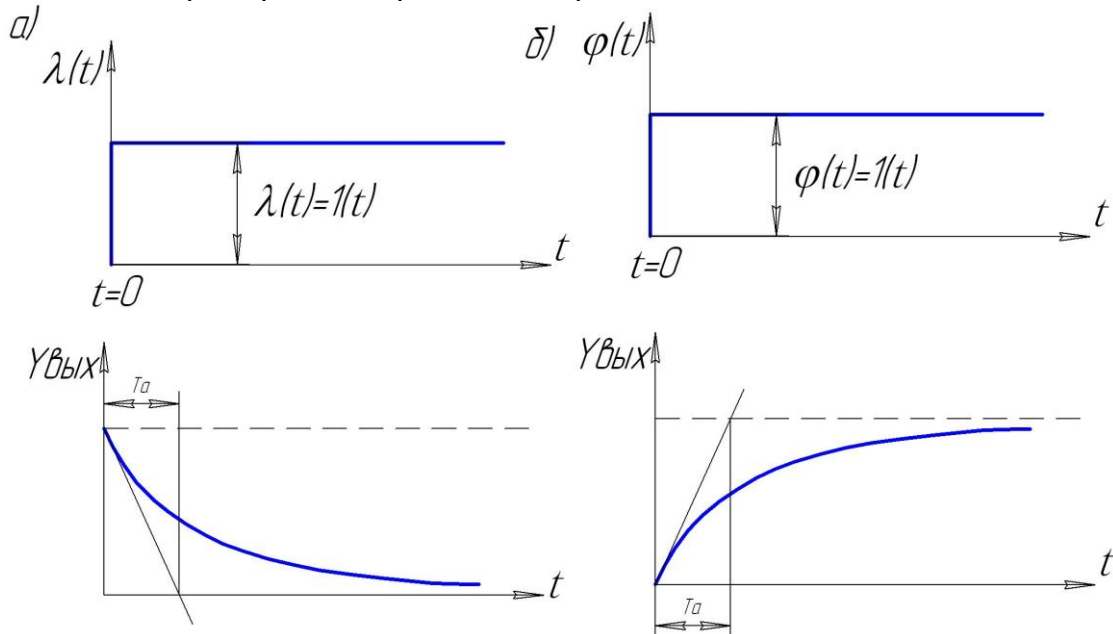


Рис. 2.1. Разгонные характеристики.

а) при $\lambda(t)$ -возмущающем воздействии, б) при $\varphi(t)$ -управляющем воздействии.

Особенность одноемкостных ОР в том, что скорость изменения $y_{\text{вых}}$ максимальна с момента нанесения воздействия. Параметры разгонных характеристик, по которым оценивают динамические свойства ОР (Рис.2.2):

T_a - время разгона для ОР-время, в течении которого регулируемый параметр изменится от своего начального значения в момент времени t_0 до заданного значения, отвечающему величине воздействия, с постоянной максимальной скоростью, соответствующей наибольшему небалансу.

Для определения T_a проводят касательную к кривой разгона из точки $t=0$. Касательная отсекает отрезок на оси времени, при пересечении касательной и заданного значения регулируемой величины, определяемого величиной воздействия. Практика получения и обработки разгонных характеристик показывает, что для одноемкостных ОР с самовыравниванием время разгона T_a соответствует времени, прошедшему от момента возникновения возмущения до момента достижения регулируемой величины значения, равного 0,633 потенциального значения $Y_{\text{уст}}^{\text{с.а.}}$.

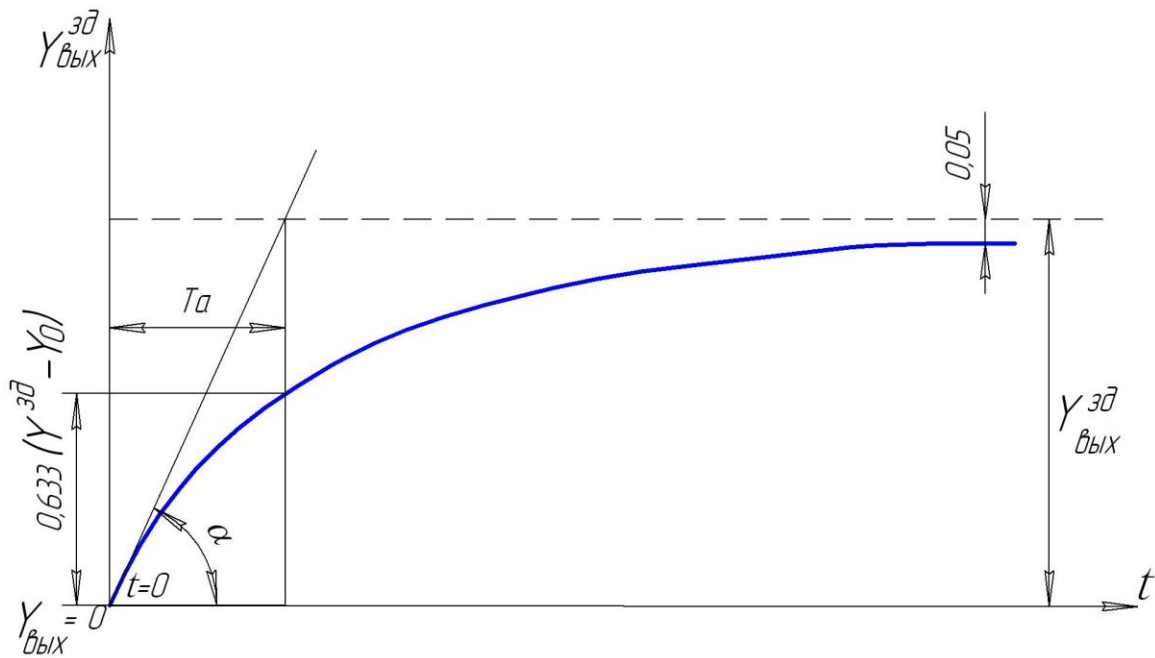


Рис. 2.2. Обработка разгонной характеристики.

Величина, обратная времени разгона называется скоростью разгона ОР $\varepsilon = \frac{1}{T_a}$.

Для ОР с самовыравниванием введено понятие степень или коэффициент самовыравнивания (саморегулирования) ρ , связывающий скорость нанесения воздействия на ОР со скоростью изменения регулируемого параметра,

$$\rho = -\frac{d\lambda/dt}{dy_{\text{вых}}/dt} = -\frac{d\lambda}{dy_{\text{вых}}}, \text{ в конечных приращениях } \rho = -\frac{\Delta\lambda}{\Delta y_{\text{вых}}}.$$

Знак (-) указывает, что самовыравнивание имеет место тогда, когда отклонение параметра вызывает уменьшение причины отклонения. Величина обратная коэффициенту самовыравнивания называется коэффициентом передачи или усиления для ОР, $K = \frac{1}{\rho}$.

Коэффициент усиления K определяется для установившегося состояния ОР, когда $y_{\text{вых}}$ конечное должно отличаться от $y_{\text{вых}}$ заданного не более, чем на 5%.

Отношение времени разгона T_a к коэффициенту самовыравнивания дает для ОР динамическую постоянную времени ОР «Т».

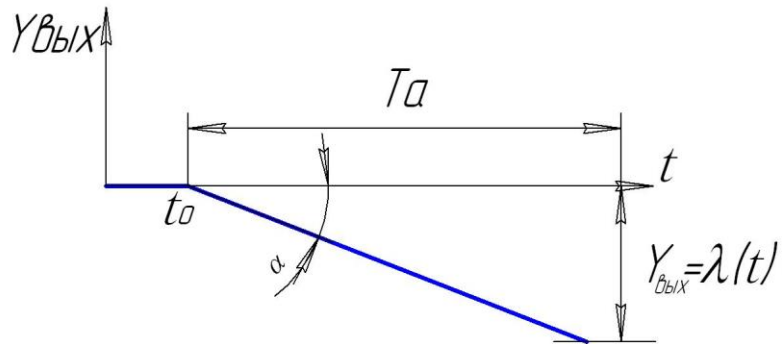
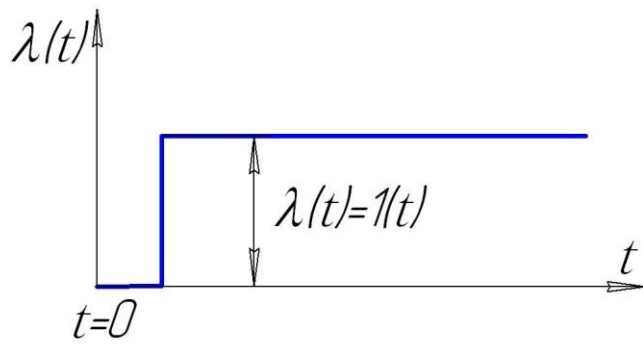
$$T = \frac{T_a}{\rho} = KT_a; K = \frac{\Delta y_{\text{вых}}}{\Delta \lambda_{\text{возм}}} = \frac{\Delta y_{\text{вых}}}{\Delta \varphi_{\text{уп}}}.$$

T - учитывает динамические и статические свойства ОР в отличие от T_a .

Время достижения конечного значения регулируемой величины называется временем переходного процесса $T_{\text{пп}}$, для практических расчетов $T_{\text{пп}} \approx 3T$. Примеры одноемкостных ОР: ротор турбоагрегата, работающего на выделенную нагрузку, емкость с водой, газом при нормативных параметрах окружающей среды. Барабан котельного агрегата, если его рассматривать как ОР по давлению пара.

Разгонные характеристики одноемкостного объекта регулирования без самовыравнивания (Рис. 2.3).

а) при возмущающем воздействии $\lambda(t)$



б) при управляющем воздействии $\varphi(t)$

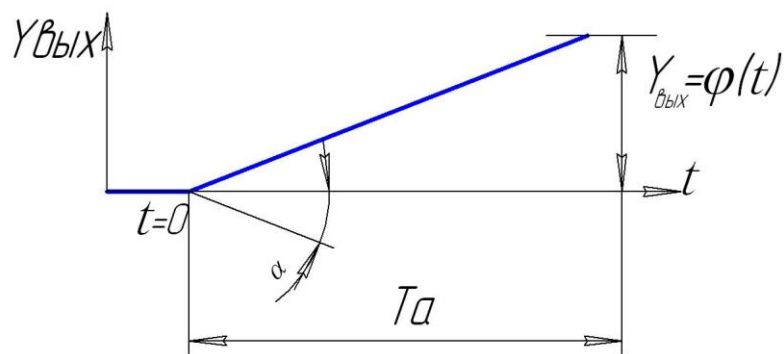
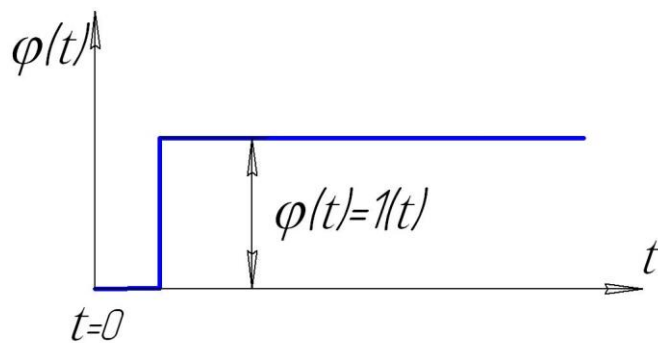


Рис. 2.3. Разгонные характеристики одноемкостного ОР без самовыравнивания.

ОР без самовыравнивания относят к числу астатических ОР. Основные параметры, характеризующие динамические свойства ОР без самовыравнивания. Время разгона T_a определяется величиной отрезка на оси времени t при условии достижения регулируемой величины значения входного воздействия $y_{\text{вых}} = \lambda(t)$ или $y_{\text{вых}} = \varphi(t)$.

Скорость разгона $\varepsilon = \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{T_a}$, ее величина зависит от угла наклона разгонной характеристики к оси времени - α . $\operatorname{tg} \alpha = \varepsilon \lambda = \frac{1}{T_a}$, при $\lambda(t) = 1(t)$ или $\operatorname{tg} \alpha = \varepsilon \rho = \frac{1}{T_a}$, при $\varphi(t) = 1(t)$. Время разгона равно $T_a =$ динамической постоянной ОР T , при этом коэффициент передачи или усиления ОР будет $K=1$.

Неустойчивые объекты или объекты с отрицательным самовыравниванием.

К числу неустойчивых относят ОР, у которых, даже при самом незначительном возмущении, отклонение параметра продолжается безгранично и со все возрастающей скоростью. Примером регулируемого объекта, имеющего в некоторых режимах отрицательное самовыравнивание, может служить шаровая барабанная мельница (ШБМ) как ОР загрузки барабана мельницы топливом. Разгонная характеристика ШБМ изображена на рис. 2.4 при ступенчатом изменении положения регулировочного органа подачи топлива m . При загрузках ниже нормальной мельница имеет положительное самовыравнивание, т.е. является устойчивым объектом. При номинальной нагрузке самовыравнивание мельницы равно нулю и она представляет собой в этом режиме астатический объект. Наконец, перегруженная мельница становится неустойчивым объектом вследствие того, что производительность мельницы (выдача пыли B_2) падает с ростом загрузки ее топливом (G). Если в режиме, когда ШБМ находится на границе устойчивости, нарушить равновесное состояние мельницы за счет увеличения подачи топлива B_1 , то наступающий при этом рост загрузки обуславливает в свою очередь уменьшение выдачи пыли B_2 .

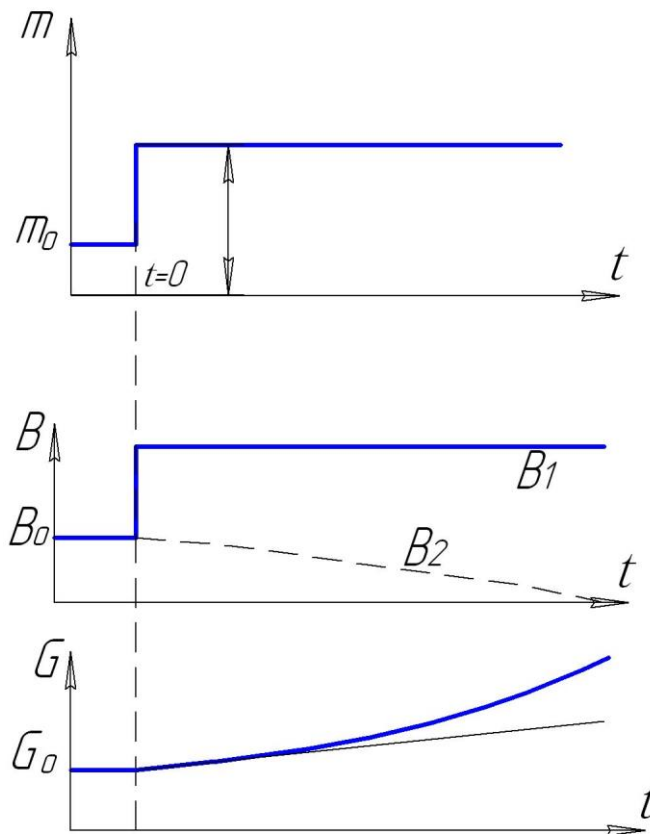


Рис. 2.4. Разгонная характеристика ШБМ

Небаланс между подачей топлива V_1 и выдачей пыли V_2 непрерывно растет и вызывает дальнейшее увеличение загрузки G со все возрастающей скоростью. Если вовремя не уменьшить подачу, то мельница быстро окажется заваленной топливом.

Чтобы выяснить, является ли объект устойчивым или не устойчивым, достаточно знать, как влияет в АСР отклонение параметра на приток и расход вещества или энергии в объекте. Если рост параметра вызывает уменьшение небаланса, то объект имеет положительное самовыравнивание. Для астатического или так называемого нейтрального объекта изменение параметра не оказывает никакого влияния на приток вещества или энергии. Наконец, если с ростом параметра небаланс увеличивается, то объект неустойчив.

Разгонные характеристики многоемкостных объектов регулирования. При автоматизации тепловых процессов на электростанциях приходится встречаться, как правило, с более сложными объектами, содержащими две, три и более емкостей. Такие многоемкостные объекты представляют цепь последовательно соединенных одноемкостных звеньев. Пример двухемкостного объекта - теплообменник со змеевиковым подогревателем, как объект регулирования температуры. Этот объект состоит из двух последовательно соединенных звеньев. Первым звеном являются обогревающие змеевики, а вторым собственно теплообменник. При регулировании температуры динамические свойства первого звена определяются тепловой емкостью змеевиков, а свойства второго звена - тепловой емкостью обогреваемого вещества. Многоемкостные объекты, также как одноемкостные, могут иметь свойства самовыравнивания или быть астатическими. Если в цепи последовательно соединенных звеньев хотя бы одно звено не имеет самовыравнивания, то и весь объект в целом является астатическим.

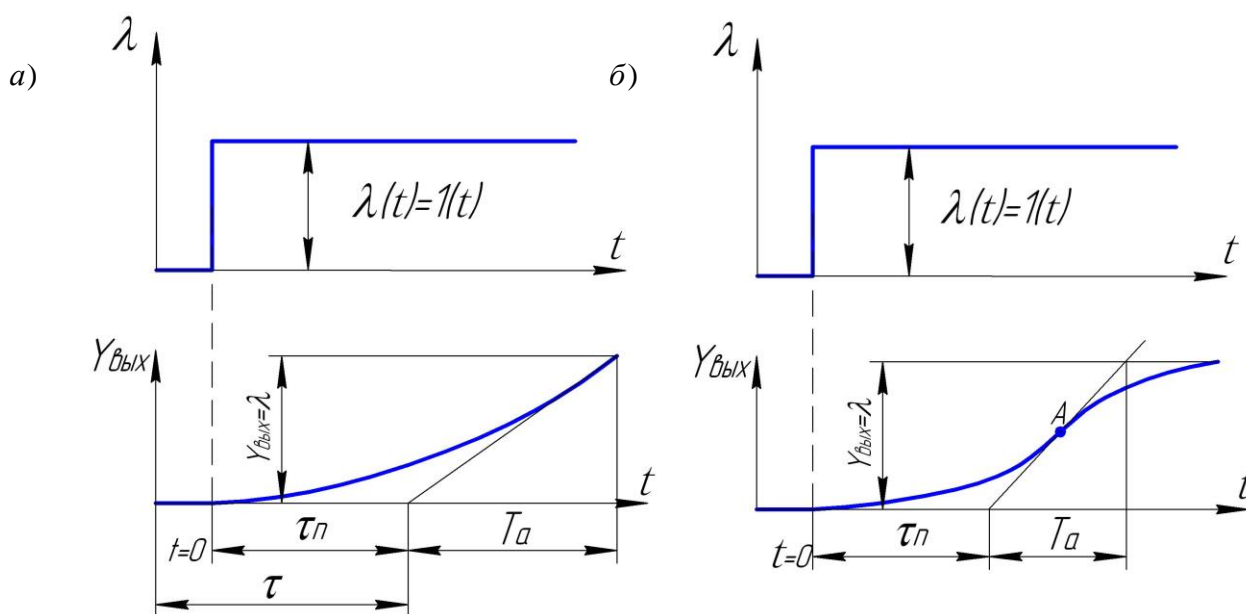


Рис. 2.5. Разгонные характеристики многоемкостных ОР
 а) астатический объект б) статический объект (с самовыравниванием).

Характерной особенностью динамических свойств многоемкостных объектов является то, что после нанесения воздействия не происходит заметного изменения регулируемого параметра (Рис. 2.5). Если у одноемкостных объектов начальная скорость изменения параметра является наибольшей, то у многоемкостных - скорость отклонения регулируемой величины после воздействия начинает постепенно возрастать от нуля и достигает своей наибольшей величины лишь спустя некоторое время. Поэтому у

многоемкостных объектов по сравнению с одноемкостными отклонение параметров на выходе ОР при прочих одинаковых условиях отстает во времени. Это отставание, вызванное наличием нескольких емкостей, называется переходным или емкостным запаздыванием. Его величина τ_n определяется отрезком, который отсекает на оси времени касательная, проведенная к разгонной кривой в точке, (А) где скорость изменения параметра достигает наибольшего значения. У объектов с самовыравниванием эта точка является точкой перегиба, статической характеристики, у астатических объектов касательной служит продолжение прямолинейной части характеристики.

Переходное запаздывание τ_n тем больше, чем больше число последовательно соединенных емкостей в объекте и чем больше величины отдельных емкостей. У некоторых сложных объектов изменение параметра может отставать во времени и не только по причине переходного запаздывания. В этом случае внешнее воздействие сказывается на состоянии объекта не сразу, а спустя некоторое время, необходимое для передачи воздействия к объекту.

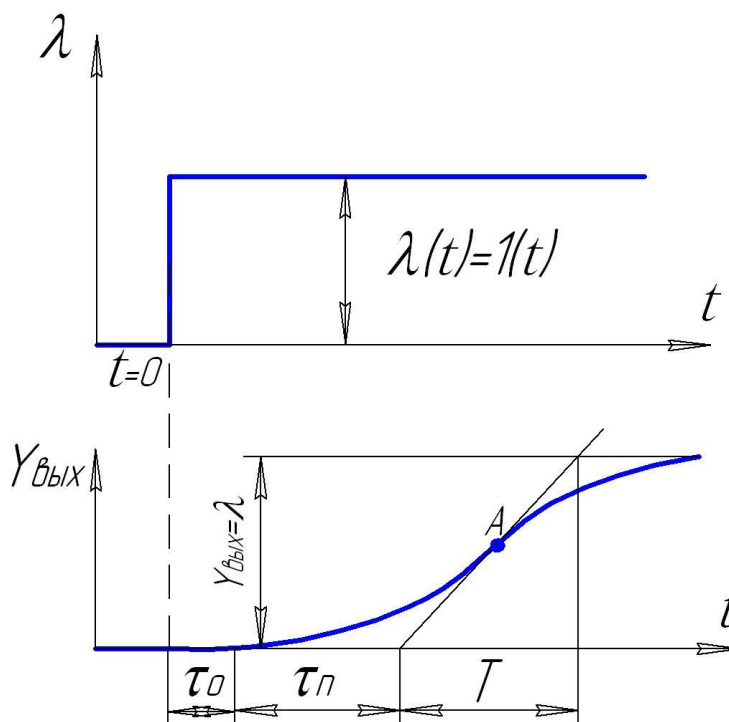


Рис. 2.6. Разгонная характеристика ОР с транспортным запаздыванием.

Так, например, после повышения числа оборотов питателей пыли пройдет известное время, пока увеличенное количество топлива пройдет по пылепроводам до топочной камеры и это скажется на режиме работы котла. В течении этого времени параметр не изменяется вообще. Отрезок времени между началом перемещения регулировочного органа и моментом, когда его действие начнет сказываться на регулируемом объекте, называется передаточным (транспортным или чистым) запаздыванием. Чистое запаздывание τ_0 и переходное запаздывание τ_n составляет в сумме полное запаздывание объекта:

$$\tau = \tau_0 + \tau_n$$

Наибольшим переходным (емкостным) запаздыванием, при прочих равных условиях, обладают тепловые объекты регулирования, наименьшим – объекты, в которых регулируется расход жидкости или газа.

Методы графического определения времени разгона T_a для многоемкостных ОР приведены на рис. 2.5 и 2.6.

2.2 Импульсные характеристики объектов регулирования.

Длительное и значительное по величине воздействие, которое приходится наносить для получения разгонных характеристик объекта регулирования, вызывает длительные изменение режима его работы и потому не всегда допустимо на действующих установках. Сокращение величины воздействий при снятии разгонных характеристик целесообразно лишь до определенных пределов, ибо в противном случае наносимое воздействие окажется соизмеримым со случайными возмущениями, имеющими место во время проведения опыта. Если по производственным условиям длительное нарушение режима невозможно, то сокращают обычно не величину воздействия, а его длительность. В этом случае динамические свойства объекта могут быть определены не по разгонной, а по импульсной характеристике.

Импульсная характеристика представляет собой кривую изменения регулируемого параметра в результате временного импульсного воздействия, то есть такого импульса, когда нанесенное ступенчатое воздействие спустя некоторый промежуток времени Δt_λ так же ступенчато полностью снимается.

Импульсное воздействие можно рассматривать как действие двух равных и противоположных по направлению ступенчатых воздействий, из которых второе нанесено позднее первого на Δt .

Импульсные характеристики для одноемкостных объектов регулирования. Для одноемкостного ОР без самовыравнивания, импульсная кривая имеет следующий вид (Рис. 2.7,а)

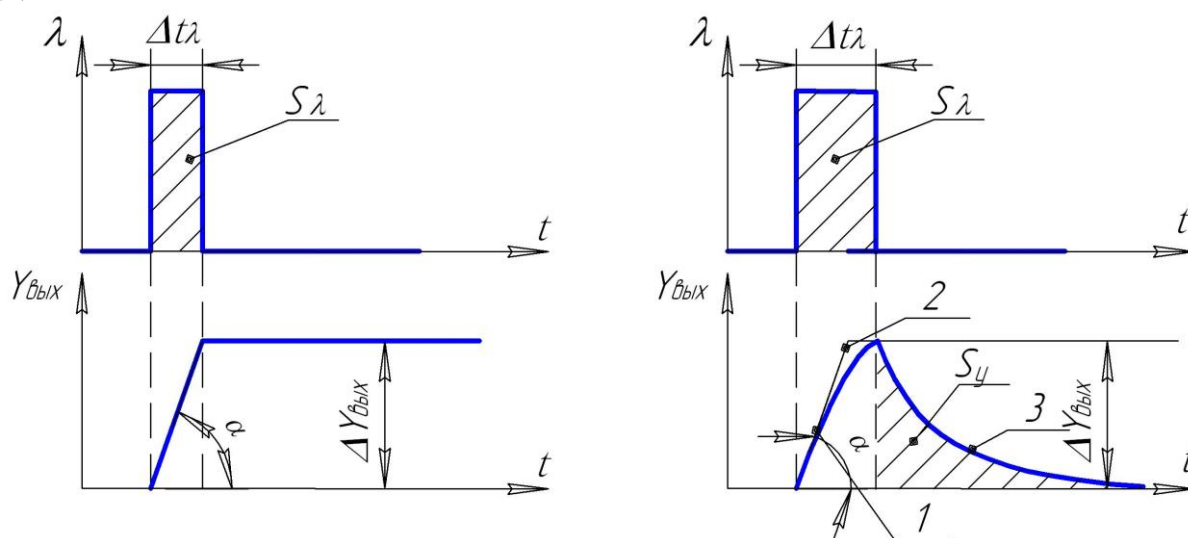


Рис. 2.7. Импульсные характеристики одноемкостного ОР: а) без самовыравнивания, б) с самовыравниванием.

В этом случае необходимо определить лишь один параметр объекта - скорость разгона ε . Она может быть определена, как и ранее, по тангенсу угла наклона прямой разгона на участке Δt к оси времени, т.к. $\operatorname{tg} \alpha = \varepsilon \lambda$ ($\varepsilon \lambda$ при $k=1$).

$$\text{Но } \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta y_{\text{вых}}}{\Delta t_\lambda}, \text{ отсюда } \frac{\Delta y_{\text{вых}}}{\Delta t_\lambda} = \varepsilon \lambda,$$

$$\text{Или } \varepsilon = \frac{\Delta y_{\text{вых}}}{\lambda_0 \Delta t_\lambda} = \frac{\Delta y_{\text{вых}}}{s_\lambda}, \text{ где } s_\lambda, \text{ - площадь занятая импульсом воздействия}$$

Для одноемкостного ОР с самовыравниванием импульсная характеристика будет иметь вид, приведенный на (Рис. 2.7,б). В этом случае необходимо определить не только скорость разгона ε (время разгона $T_a = \frac{1}{\varepsilon}$), но и степень самовыравнивания ОР- ρ (коэффициент передачи $k = \frac{1}{\rho}$).

Скорость разгона ε можно определить как для одноемкостного ОР без самовыравнивания, но ее значение будет приближенным, так как для ОР с самовыравниванием кривая (1) в интервале Δt_λ экспонента, а не прямая.

$$\text{Тогда } \varepsilon = \frac{\Delta y_{\text{вых}}}{s_\lambda} ; T_a = \frac{s_\lambda}{\Delta y_{\text{вых}}} .$$

После снятия импульсного воздействия регулируемая величина возвращается к первоначальному значению (кривая 2). Уравнение этой кривой является уравнением экспоненты $y = Ce^{-\varepsilon t} = \Delta y_{\text{вых}} e^{-\varepsilon t}$, в котором искомые ε и ρ .

Проинтегрируем это уравнение

$$S_y = \int_0^\infty \Delta y_{\text{вых}} y e^{-\varepsilon t} dt = -\Delta y_{\text{вых}} \frac{1}{\varepsilon} \int_0^\infty e^{-\varepsilon t} dt ,$$

знак (-) говорит о том, что кривая нисходящая,

S_y - площадь под экспонентой возврата (3)

В конечных значениях

$$S_y = \frac{\Delta y_{\text{вых}}}{\varepsilon \rho}, \text{ тогда } \rho = \frac{\Delta y_{\text{вых}}}{\varepsilon S_y}, \text{ но } \varepsilon = \frac{\Delta y_{\text{вых}}}{s_\lambda}, \text{ значит } \rho = \frac{s_\lambda}{S_y}, k = \frac{S_y}{s_\lambda}; T = kT_a = \frac{S_y}{\Delta y_{\text{вых}}} .$$

Импульсная характеристика многоемкостного ОР. На рис. 2.8 приведена импульсная характеристика многоемкостного ОР с самовыравниванием.

Реальный импульс воздействия обычно имеет не прямоугольную, а трапецеидальную форму, так как нанесение воздействия и его снятие совершаются с конечной, хотя и большой скоростью.

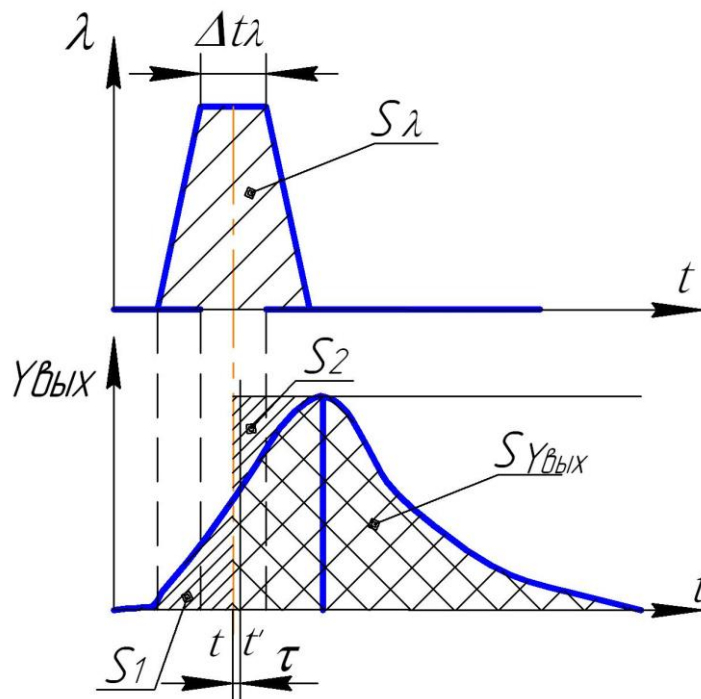


Рис. 2.8. Импульсная характеристика многоемкостного ОР.

Время емкостного запаздывания τ можно определить как отрезок времени от (середины импульса) до точки перегиба восходящей ветви импульсной характеристики. Точка перегиба легко определяется, так как она отсекает площади S_1 и S_2 , равные между собой. Определение величины ε , ρ , τ указанным выше способом тем точнее, чем короче импульс воздействия и чем больше при этом отклонение регулируемой величины $y_{\text{вых}}$. Динамические свойства объекта могут быть определены по его импульсной характеристике методом достраивания импульсной характеристики до разгонной кривой или методом планиметрирования импульсной характеристики (Рис. 2.9).

Метод достраивания импульсной характеристики. Разгонную характеристику можно построить по импульсной, пользуясь тем, что в случае линейности статических характеристик объекта регулирования отклонение регулируемого параметра, полученное в результате нескольких воздействий, равно в каждый данный момент времени алгебраической сумме отклонений регулируемой величины вследствие каждого из воздействий в отдельности. Это является следствием аддитивности (или наложения) переходных функций. На этом основании импульсную характеристику можно представить как алгебраическую сумму двух одинаковых, но противоположных по направлению кривых отклонений параметра y_1 и $-y_2$, из которых вторая запаздывает по сравнению с первой на Δt_λ , то есть на величину длительности действия импульсного воздействия.

Построение разгонной характеристики по импульсной производят в следующем порядке.

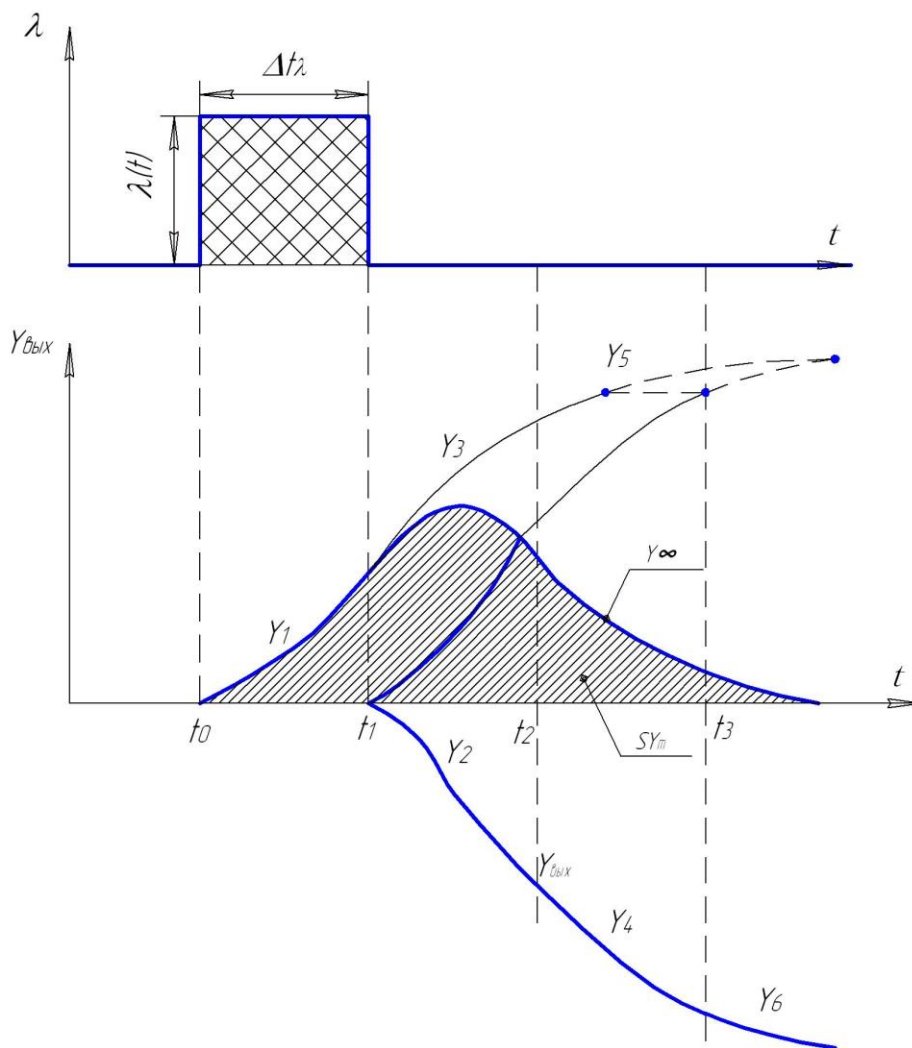


Рис. 2.9. Обработка импульсной характеристики.

На оси времени t отмечают отрезки времени $t_1 - t_0 = t_2 - t_1 = \Delta t_\lambda$ и т.д.

На отрезке $t_1 - t_0 = \Delta t_\lambda$ импульсная характеристика совпадает с кривой разгона $-y_1$. С момента времени t_1 начинается кривая $-y_2$, участок которой на отрезке времени от t_1 до t_2 в точности соответствует участку кривой y_1 на предыдущем отрезке времени от t_0 до t_1 . Кривая y на отрезке времени от t_1 до t_2 может быть построена как сумма кривых y_1 и $-y_2$. По найденному дополнительному отрезку y_1 продолжается кривая $-y_2$ на отрезке времени $t_3 - t_2$ и т.д. В результате получают кривую разгона $y_{вых}$.

Метод планиметрирования импульсной характеристики. В некоторых производственных условиях, когда значительные нарушения режима особо нежелательны, приходится ограничивать даже импульсное воздействие. При этом допустимая длительность воздействия Δt_λ становится настолько малой, что достраивание разгонной характеристики оказывается громоздким и практически недостаточно точным. В этих случаях целесообразно прибегнуть к другому способу обработки импульсной характеристики, а именно, к определению параметров ОР непосредственно по величине площади, ограниченной импульсной характеристикой. Имея ввиду представленные выше зависимости находят

$$\rho = \frac{s_\lambda}{S_y}; k_y = \frac{\sigma_\infty}{\lambda} = \frac{s_y}{s_\lambda}$$

$\tau = t' - t$ - время переходного запаздывания, при $s_1 = s_2$.

Постоянная времени объекта $T = \frac{s_{y^\infty}}{\Delta y_{вых}^{max}}$;

Скорость разгона $\varepsilon = \frac{\Delta y_{вых}^{max}}{S_\lambda}$.

2.3 Частотные характеристики объектов регулирования.

Частотные характеристики определяют путем приложения к ОР воздействия периодической гармонической формы. Схема получения частотных характеристик приведена на рис. 2.10.

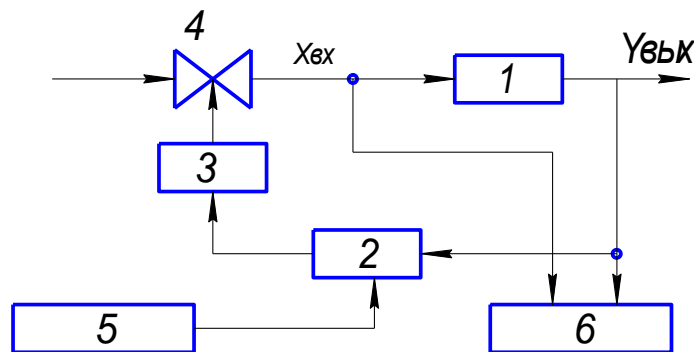


Рис. 2.10. Схема получения частотных характеристик

1- объект регулирования, 2- регулятор, 3- исполнительный механизм, 4- регулировочный орган, 5- генератор колебаний, 6- регистратор.

Для получения частотной характеристики нет необходимости размыкать главную обратную связь в АСР. Частотный сигнал подается на задатчик регулятора от генератора синусоидальных колебаний. При этом перемещения регулировочного органа также

принимают гармоническую синусоидальную форму с определенной амплитудой и заданной частотой (Рис. 2.11).

$$\tilde{\sigma}_{\dot{a}\ddot{o}}(t) = A_{\dot{a}\ddot{o}} \sin \omega t ,$$

$A_{\dot{a}\ddot{o}}$ - амплитуда колебаний входного сигнала

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \text{ - угловая частота воздействия (рад/сек или рад/мин)}$$

T - период колебаний, с или мин, зависящий от частоты воздействия.

Для определения частотной характеристика ОР колебательные воздействия на входе объекта наносятся с различными частотами. Спустя некоторое время после начала воздействий, когда затухает переходный процесс – свободные колебания, на выходе ОР устанавливаются вынужденные колебания выходного (регулируемого) параметра $y_{\text{вых}}(t)$. При установившихся колебаниях $x_{\text{вх}}(t)$ сигнал на выходе объекта, если он является линейным, $y_{\text{вых}}(t)$ так же изменяется по гармоническому закону с той же частотой ω , но его амплитуда $A_{\text{вых}}$ и сдвиг по фазе колебаний могут изменяться в зависимости от динамических свойств объекта исследования.

$$y_{\text{вых}}(t) = A_{\text{вых}} \sin(\omega t - \varphi) ,$$

$A_{\text{вых}}$ - амплитуда выходных колебаний

$$\varphi = \frac{2\pi}{T} \Delta t \text{ - сдвиг по фазе.}$$

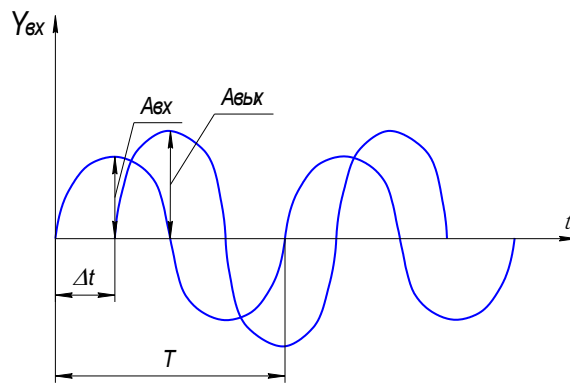


Рис. 2.11. Синусоидальные изменения сигналов $x_{\text{вх}}$ и $y_{\text{вых}}$

Сигналы $x_{\text{вх}}$ и $y_{\text{вых}}$ подаются на регистратор. Зависимость отношения амплитуды выходного сигнала к амплитуде входного воздействия измеренных для одной частоты ω , от частоты колебаний входного сигнала называется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ).

$$M(\omega) = \frac{A_{\text{вых}}}{A_{\text{вх}}}(\omega) .$$

Зависимость сдвига фаз между выходными и входными сигналами для одной частоты от частоты колебаний входного гармонического сигнала называется фазно- частотной характеристикой (ФЧХ).

$$\varphi(t) = \omega \Delta t ,$$

Комплекс частотных характеристик $M(\omega)$ и $\varphi(t)$ называют комплексными частотными характеристиками (КЧХ) или амплитудно-фазовой характеристикой (АФХ). АФХ строятся в полярных координатах или на плоскости комплексных переменных в декартовых координатах и представляют собой годограф вектора (кривая, описываемая

концом вектора), построенного из начала координат для различных значений частот от $\omega = 0$ до $\omega = \infty$. Модуль этого вектора равен $M(\omega)$, а аргумент или угол поворота - $\varphi(\omega)$.

Запись АФХ в полярных координатах

$$\dot{I}(i\omega) = M(\omega)e^{i\varphi(\omega)}, \quad M(\omega) - \text{модуль}, \quad \varphi(\omega) - \text{фаза.}$$

Для инженерных расчетов широко применяется графическое изображение АФХ на комплексной плоскости в прямоугольных координатах $V(\omega)$, $iV(\omega)$ (Рис. 2.12)

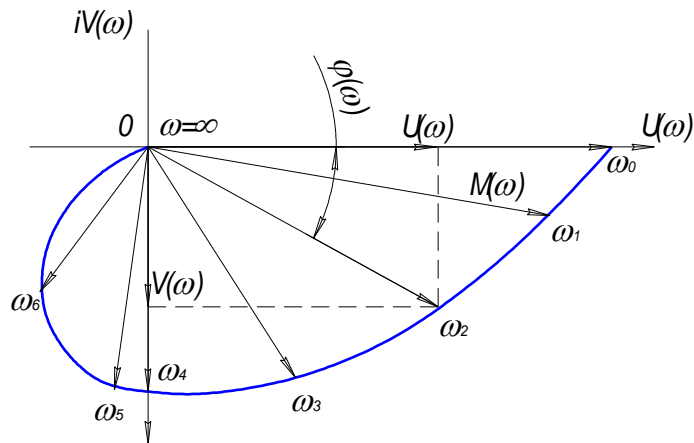


Рис.2.12 Амплитудно-фазовая характеристика.

$$M(i\omega) = U(\omega) + iV(\omega), \quad \text{где}$$

$$U(\omega) = M(\omega) \cos \varphi(\omega) - \text{вещественная часть вектора АФХ,}$$

$$V(\omega) = M(\omega) \sin \varphi(\omega) - \text{мнимая часть вектора АФХ,}$$

Длина вектора или его модуль

$$M(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)},$$

$$\text{аргумент или угол поворота вектора вокруг начала координат } \varphi(\omega) = \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)}.$$

Свойства ОР оказывают большое влияние на процессы регулирования при сравнительно высоких частотах воздействия на объект. Поэтому при экспериментальном определении частотных характеристик ОР наибольшее количество опытных точек должно быть снято при сравнительно больших значениях частоты ω . Наибольшая частота, для которой определяется ЧХ объекта, называется частотой среза, при которой колебания входного воздействия с наибольшей возможной в экспериментальных условиях амплитудой $A_{\text{макс}}$ обуславливают колебания на выходе с амплитудой $A_{\text{мин}}$, лежащей в пределах чувствительности регулятора.

Частотный метод исследования регулятора позволяет автоматически поддерживать в среднем нормальный режим работы объекта, при этом также отсутствует дрейф колебаний $y_{\text{вых}}(t)$.

Создание строго синусоидальных колебаний на входе в объект требует специальных устройств-генераторов синусоидальных колебаний и вызывает значительные затруднения. Поэтому ЧХ определяют чаще при более простых видах воздействия – прямоугольных или трапецидальных периодических импульсах. При таких воздействиях, называемых прямоугольной или трапецидальной волной, отношение амплитуд и сдвиг фаз не будут соответствовать отношению амплитуд и сдвигу фаз при синусоидальных колебаниях. Поэтому по результатам эксперимента при такого вида воздействиях ЧХ могут быть построены лишь при специальной обработке опытных данных.

Частотные характеристики должны быть определены не только при регулирующем воздействии на ОР, но и при всех основных видах воздействий к ОР.

При снятии АФХ необходимо предварительно эксперименту выбрать диапазон частот входного воздействия. Этот диапазон определяется в основном целевым назначением АФХ. Если частотные характеристики предназначены для расчета АСР промышленного объекта, то интерес представляют значения АФХ при фазовых сдвигах $90-230^\circ$ и требуется проведение опытов на 6-8 различных частотах.

ГЛАВА 3. МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

В ряде случаев, при необходимости детального исследования АСР, экспериментальные исследования могут оказаться очень громоздкими и трудными, а иногда такие исследования просто невозможно провести на действующем промышленном оборудовании. Кроме того, в условиях эксплуатации зачастую трудно выделить в чистом виде тот или иной процесс длительное время из-за наличия разного рода эксплуатационных помех. По тем или иным причинам практически невозможно достаточно точно воспроизвести дважды или несколько раз один и тот же процесс. Наконец, бывают случаи, когда необходимо исследовать различные варианты систем регулирования для сложных ОР с несколькими взаимосвязанными параметрами регулирования или же когда надо выбрать и исследовать АСР для вновь проектируемого ОР.

В связи со всем перечисленным во многих случаях целесообразно проводить эксперименты не на самом объекте и его АСР, а на их моделях. При этом не обязательно, чтобы модель представляла собой уменьшенную копию промышленного оборудования, сохраняя точное подобие физических процессов. Достаточно создать такую модель, процессы в которой подчиняются тем же закономерностям, что и в реальных системах, т.е. могут быть описаны с достаточной степенью приближения дифференциальными уравнениями нулевого и более высокого порядка.

Реальная система может быть системой с сосредоточенными и распределенными параметрами. Поведение систем с сосредоточенными параметрами определяется конечным числом независимых переменных, имеющих любую физическую природу (температура, давление, уровень), их число определяет число степеней свободы системы и может быть описано обыкновенными дифференциальными уравнениями. Системы с распределенными параметрами имеют бесконечное число степеней свободы, когда поведение определяющего параметра системы рассматривается не только во времени, но и в пространственных координатах. Движение этих систем описывается дифференциальными уравнениями с частными производными.

Сложные системы, содержащие элементы с распределенными параметрами, могут быть с достаточным приближением замещены эквивалентными системами, составленными из конечного числа элементов с одной степенью свободы. При математическом исследовании АСР выбирают обобщенные координаты систем так, что-бы каждую из этих координат можно было рассматривать одновременно как выходную и входную предыдущего и последующего элемента АСР.

3.1 Методы составления дифференциальных уравнений АСР.

АСР, как и любой ее элемент, называется линейной или нелинейной в зависимости от того линейной или нелинейной является ее математическая модель-система дифференциальных и алгебраических уравнений, связывающих между собой входные и выходные параметры системы. Все реальные системы являются в той или иной степени

нелинейными системами. Нелинейность систем в большинстве случаев связана с нелинейностью реальных статических характеристик элементов АСР. Решение системы дифференциальных уравнений, описывающих поведение такой системы, в общем виде получить нельзя. Возникает необходимость линеаризовать, если это возможно, систему нелинейных уравнений математической модели, заменив ее более простой, приближенной линейной системой. Если уравнения модели АСР нелинейны из-за нелинейности статической характеристики ее элементов, то линеаризация уравнения сводится к замене нелинейной статической характеристики элемента $y = f(x)$, (Рис.3.1,а,б) некоторой линейной функцией $y = ax + b$, где y - выходной параметр, x - входной параметр.

Математически эта замена производится путем разложения в ряд Тэйлора функции $y = f(x)$ в окрестности точки, соответствующей установившемуся состоянию. Геометрически это означает замену нелинейной статической характеристики $y = f(x)$ касательной, проведенной к кривой в точке с координатами x_0, y_0 , соответствующей установившемуся состоянию работы объекта математического исследования.

В других случаях линеаризация производится путем проведения секущей, мало отклоняющейся от функции $y = f(x)$ в требуемом диапазоне изменения выходной величины объекта (Рис.3.1,в).

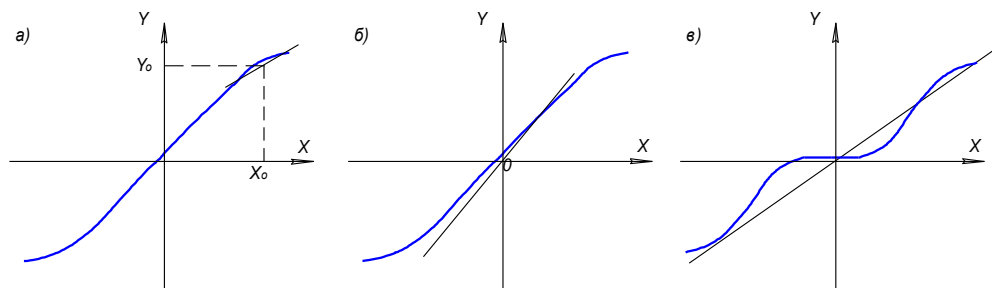


Рис. 3.1. Линеаризация статических характеристик.

Нелинейные статические характеристики, линеаризуемые в требуемом диапазоне изменения выходной величины рассмотренными выше способами, называют несущественно нелинейными характеристиками. Наряду с ними имеются так же характеристики, которые не поддаются линеаризации. Последние называются существенно нелинейными (Рис. 3.2).

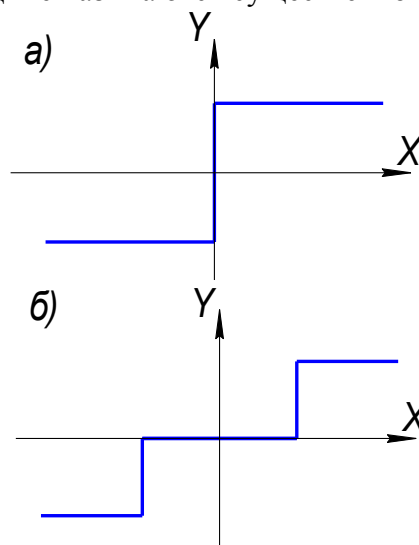


Рис. 3.2. Статические характеристики релейных элементов
а) идеального; б) с зоной нечувствительности.

Аппроксимация такого рода разрывных характеристик прямой линией с постоянным углом наклона может привести к существенному искажению представлений о процессах, происходящих в реальной АСР.

Пусть поведение объекта исследования описывается нелинейным дифференциальным уравнением в общем виде:

$$F(y'', y', y, x) = 0, \quad (3.1)$$

Установившееся состояние объекта характеризуется уравнением, для получения которого в уравнении (3-1) следует положить $y = \text{idem}$, $x = \text{idem}$.

$$F(0, 0, y_0, x_0) = 0, \quad (3.2)$$

где x_0 и y_0 - значения координат, соответствующие установившемуся состоянию объекта, тогда координаты x и y можно записать в виде

$$x = x_0 + \Delta x,$$

$$y = y_0 + \Delta y,$$

где Δx и Δy - отклонения координат x и y от установившегося состояния.

$$\text{Уравнение (3-1) в отклонениях имеет вид } F(\Delta y'', \Delta y', y_0 + \Delta y, x_0 + \Delta x) = 0 \quad (3-3)$$

Разложим левую часть уравнения (3-3) в ряд Тейлора относительно точки установившегося состояния $(0, 0, y_0, x_0)$.

$$F(0, 0, y_0, x_0) + \left(\frac{\partial F}{\partial y''}\right)_0 \Delta y'' + \left(\frac{\partial F}{\partial y'}\right)_0 \Delta y' + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)_0 \Delta y + \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_0 \Delta x + \dots = 0 \quad (3-4)$$

В левой части равенства (3-4) не записаны члены, содержащие отклонения Δx и Δy и их производные в степени выше первой. Частные производные в левой части уравнения (3-4) представляют собой некоторые числа, величины которых зависят от вида исходной функции $F(y'', y', y, x)$ и значений координат x_0 и y_0 . Считая отклонения Δx и Δy от установившегося состояния, а так же их производные по времени малыми и полагая, что функция $F(y'', y', y, x)$ достаточно гладкая по всем аргументам в окрестности точки, соответствующей установившемуся состоянию, отбросим в уравнении (3-4) все члены, которые содержат отклонения Δx и Δy , а так же их производные выше первой, получим уравнение

$$\left(\frac{\partial F}{\partial y''}\right)_0 \Delta y'' + \left(\frac{\partial F}{\partial y'}\right)_0 \Delta y' + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)_0 \Delta y + \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_0 \Delta x = 0, \quad (3-5)$$

которое является линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами $\left(\frac{\partial F}{\partial y''}\right)_0$, $\left(\frac{\partial F}{\partial y'}\right)_0$, $\left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)_0$, $\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_0$.

Уравнение (3-5) представляет собой результат линеаризации уравнения (3-1).

Очевидно, что необходимым условием линеаризации уравнения является возможность разложения в ряд Тэйлора функции $F(y'', y', y, x)$ в окрестности точки, соответствующей установившемуся состоянию. Линеаризованное уравнение (3-5) приближенно заменяет нелинейное уравнение (3-1) в некоторой малой окрестности точки с координатами $(0, 0, y_0, x_0)$. Как правило, с помощью уравнения (3-5) можно исследовать поведение объекта лишь при малых колебаниях входной и выходной координаты относительно установившегося состояния.

Обычно при записи линеаризованного уравнения в левой его части оставляют лишь члены, содержащие отклонения выходной координаты, а все остальные члены переносят в правую часть. С учетом этого уравнение (3-5) можно переписать в виде:

$$a_1 \Delta y'' + a_2 \Delta y' + a_3 \Delta y = b_1 \Delta x, \quad (3-6)$$

$$\text{где } a_1 = \left(\frac{\partial F}{\partial y''}\right)_0; a_2 = \left(\frac{\partial F}{\partial y'}\right)_0; a_3 = \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)_0; b_1 = -\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_0$$

Принято записывать уравнение не в приращениях, а в относительных величинах, относя приращения к неким базисным значениям параметров. Обозначим

$$\frac{\Delta y}{y_0} = y; \frac{\Delta y'}{y_0} = y'; \frac{\Delta y''}{y_0} = y''; \frac{\Delta x}{x_0} = x$$

За базисные могут быть теоретически выбраны любые значения параметра, обычно максимальные либо номинальные значения параметров, отвечающие выбранному установившемуся режиму, тогда уравнение (3-6) предстанет в виде

$$a_1 y_0 y'' + a_2 y_0 y' + a_3 y_0 y = b_1 x_0 x \quad (3-7)$$

обозначив $a_1 y_0 = a_0; a_2 y_0 = a_1; a_3 y_0 = a_2; b_1 x_0 = b_0$,

получим $a_0 y'' + a_1 y' + a_2 y = b_0 x$, (3-8)

$$\text{где } y'' = \frac{d^2 y}{dt^2}; y' = \frac{dy}{dt};$$

В итоге уравнение (3-8) будет иметь вид

$$a_0 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_2 y = b_0 x \quad (3-9)$$

Совокупность такого вида уравнений описывает поведение динамической системы, решив которые можно получить описание переходного процесса в этой системе.

Постоянные коэффициенты уравнений могут быть определены либо аналитически, например, для тепловых объектов по данным теплового расчета объекта, его конструктивным характеристикам, либо из графиков статических характеристик. Последние строятся при постоянных значениях всех независимых переменных, кроме той, по которой вычисляется производная. Если статические характеристики линейны в широком диапазоне режимов работы или допустимо осреднение характеристик в широкой области, то полученные линейные уравнения применены для исследования так же при больших отклонениях Δx и Δy .

3.2. Операторы дифференцирования и передаточные функции. Преобразования Лапласа.

Линейные дифференциальные уравнения с постоянными коэффициентами удобно записывать в символической операторной форме

$$a_0 p^2 y + a_1 p y + a_2 y = b_0 x, \quad (3-10)$$

где символ $p = \frac{d}{dt}$ назван оператором дифференцирования,

n -ая производная от $y(t)$ будет $\frac{d^n y(t)}{dt^n} = p^n y(t)$.

Дифференциальные уравнения высокого порядка, имеющие производные в левой и правой части, в операторной форме примет вид

$$D(p)y(t) = M(p)x(t), \quad (3-11)$$

где $D(p) = a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3$,

$$M(p) = b_0 p^2 + b_1 p + b_2.$$

Многочлен $D(p)$ называют собственным оператором объекта (элемента), а многочлен $M(p)$ - входным оператором. Собственный оператор $D(p)$ характеризует собственное движение описываемого объекта (элемента), то есть движения при отсутствии внешних

воздействий. Входной оператор $M(p)$ характеризует воздействие, приложенное к объекту (элементу). Отношение входного оператора $M(p)$ к собственному оператору $D(p)$ называют передаточной функцией $W(p)$ объекта (элемента АСР), описываемого линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами.

$$W(p) = \frac{M(p)}{D(p)},$$

тогда решение уравнения (3-11) может быть найдено в виде алгебраического уравнения

$$y(t) = W(p)x(t) \quad (3-12)$$

Идею перехода к алгебраическому методу решения дифференциальных уравнений дал английский физик Хэвисайд, который и ввел символ $p = \frac{d}{dt}$.

Однако при решении ряда задач с не нулевыми начальными условиями использование оператора дифференцирования $p = \frac{d}{dt}$ не давали адекватного ответа.

Строгое математическое обоснование такого перехода дал Пьер Симон Лаплас и этот метод получил название операционного исчисления или метод преобразований Лапласа, согласно которому решение дифференциальных уравнений переводится из плоскости оригиналов (плоскости действий переменной t) в плоскость изображений (переменной S). Выполняя действия над изображением оригинала получают изображение ответа. А затем по изображению ответа ищут его оригинал.

Допустим имеем функцию $x(t)$, предположим, что эта функция удовлетворяет условиям Деришле, существо которых:

- а) непрерывность функции и ее производных, это значит в исследуемом интервале функция не имеет разрыва,
- б) функция абсолютно интегрируема, т.е. интеграл функции от 0 до ∞ есть конечное число

$$\left| \int_0^{\infty} x(t) dt \right| < \infty$$

Возьмем интеграл от функции xe^{-st}

$$\int_0^{\infty} xe^{-st} dt, \text{ где } s = c \pm iw \text{ комплексная переменная,}$$

тогда интеграл уже не будет функцией от t , но станет функцией от S .

$$\text{Обозначим } \int_0^{\infty} xe^{-st} dt = \bar{x}(s)$$

Этот интеграл назван изображением функции по Лапласу, а то действие, которое отражает этот интеграл, называется прямое преобразование Лапласа. Принято записывать прямое преобразование по Лапласу как $L\{x(t)\}$, которое называют так же L -преобразованием.

Для большого количества функций изображения найдены.

Например, изображение постоянной величины: $x(t) = a$.

$$L\{a\} = \frac{a}{s} \text{ будет } \bar{a} = \frac{a}{s}, \text{ если в действительной плоскости } a=1, \text{ то в плоскости}$$

изображений 1 становится величиной $\frac{1}{s}$.

Изображение производной $x'(t)$: $\bar{x}' = sx$; $\bar{x}^n = s^n x$.

Американский математик Карсон предложил ввести преобразования вида $\bar{x}(s) = s \int_0^{\infty} x e^{-st} dt$, то есть практически изменил масштаб величины. Законы,

установленные Лапласом, остаются, но при этом 1 остается 1, а число a числом a .

Запишем исходное уравнение

$$a_0 y' + a_1 y = b_0 x' + b_1 x \quad (3-13)$$

в изображениях по Лапласу, умножив обе части уравнения на $e^{-st} dt$, получим

$$a_0 y' \cdot e^{-st} dt + a_1 y \cdot e^{-st} dt = b_0 x' \cdot e^{-st} dt + b_1 x \cdot e^{-st} dt \quad (3-14)$$

Проинтегрируем уравнение (3-14) в области от 0 до ∞

$$a_0 \int_0^{\infty} y' \cdot e^{-st} dt + a_1 \int_0^{\infty} y \cdot e^{-st} dt = b_0 \int_0^{\infty} x' \cdot e^{-st} dt + b_1 \int_0^{\infty} x \cdot e^{-st} dt \quad (3-15)$$

Пусть имеем нулевые начальные условия, то есть $x(0) = 0; y(0) = 0$, тогда в изображении по Лапласу уравнение (3-15) примет вид

$$a_0 s \bar{y} + a_1 \bar{y} = b_0 s \bar{x} + b_1 \bar{x} \quad (3-16)$$

$$\text{или } (a_0 s + a_1) \bar{y} = (b_0 s + b_1) \bar{x} \quad (3-17)$$

Последнее означает, что решение дифференциального уравнения в действительной плоскости –плоскости действительной переменной t перевели в плоскость изображения-плоскость комплексной переменной s , и решают это уравнение как алгебраическое.

Далее по найденному изображению ответа находят его оригинал.

Для нахождения оригинала ответа надо воспользоваться обратным изображением Лапласа

$$x(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-iw}^{c+iw} \bar{x}(s) e^{-st} ds,$$

для этого существует таблица функций обратных переходов.

Преобразуем дифференциальное уравнение, описывающее движение системы (3-11), по Лапласу, предположив нулевые начальные условия при его решении, введем обозначения:

$$L[y(t)] = Y(s) \text{ и } L[x(t)] = X(s),$$

где $Y(s)$ и $X(s)$ - изображения функции оригинала $y(t)$ и $x(t)$

получают

$$D(s)Y(s) = M(s)X(s), \quad (3-18)$$

здесь $D(s) = a_0 S^n + a_1 S^{n-1} + \dots + a_n$, $M(s) = b_0 S^m + b_1 S^{m-1} + \dots + b_n$

При нулевых начальных условиях $S = \pm i\omega$.

Используя обозначение $\Phi(s) = \frac{M(s)}{D(s)}$, решение уравнения (3-18) примет вид

$$y(s) = \Phi(s)x(s)$$

Это уравнение связывает изображения $y(s)$ выходной координаты системы с изображением $x(s)$ -входного воздействия.

Функция $\Phi(s)$ - характеризует динамические свойства системы и называется передаточной функцией $\Phi(s) = \frac{y(s)}{x(s)}$. Она представляет собой отношение изображения по

Лапласу выходной координаты системы к изображению по Лапласу входного воздействия при нулевых начальных условиях. Подобное определение функции не находится в

противоречии с ранее данным определением передаточной функции $W(p) = \frac{M(p)}{D(p)}$, т.к.

для решения системы дифференциальных уравнений при нулевых начальных условиях комплексная переменная s отождествлена с оператором дифференцирования p .

Таким образом, зная передаточную функцию системы $\Phi(s)$ и определив изображение $x(s)$ воздействия $x(t)$, приложенного к системе, можно найти изображение $Y(s)$ выходной координаты системы $y(t)$, а затем, переходя от изображения $y(s)$ к оригиналу $y(t)$, получить процесс изменения выходной координаты при наличии входного воздействия.

Имея передаточную функцию $\Phi(s)$ нетрудно определить амплитудно-фазовую характеристику этой системы, заменив S на $i\omega$

$$\Phi(i\omega) = \frac{M(i\omega)}{D(i\omega)},$$

где: ω -частота нанесения входного воздействия и при установившемся колебательном движении системы – частота изменения ее выходной координаты.

3.3 Примеры составления уравнений объектов регулирования.

Уравнения ротора турбины. На ротор турбоагрегата действует с одной стороны-вращающий момент, обусловленный движущими силами на лопатках турбины, расходом пара в проточную часть турбоагрегата, а с другой – момент сил сопротивления со стороны генератора, для привода которого служит турбина (Рис.4.1).

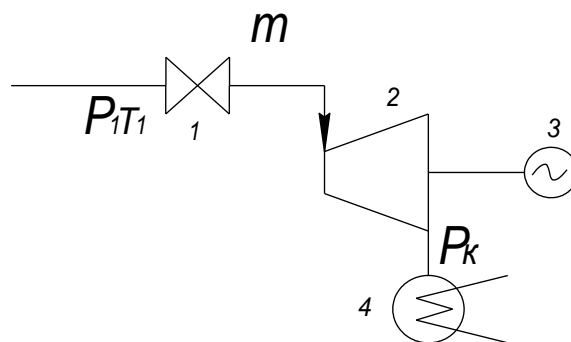


Рис. 3.1. Паровая конденсационная турбина
1- регулировочные клапаны, 2- турбина, 3- генератор, 4- конденсатор.

При установившемся режиме работы турбогенератора ротор вращается равномерно с постоянной скоростью, что возможно только при равенстве моментов сил M_T - движущих сил и M_G -сил сопротивления.

$$M_{T0} - M_{G0} = 0, \quad (3-19)$$

Индекс нуль соответствует установившемуся движению.

В процессе регулирования равенство моментов сил может нарушаться, например, из-за изменения давления пара перед турбоагрегатом, расхода пара в проточной части турбины, изменения электрического сопротивления приборов и агрегатов, подключенных к генератору.

Для неустановившегося движения, согласно теоремы Эйлера об изменении момента количества движения, производная во времени от главного момента движения системы относительно оси ротора равна главному моменту внешних сил относительно этой оси.

$$\frac{d}{dt}(J\omega) = M_{\Delta} - M_{\bar{A}} \quad (3-20)$$

Здесь J - момент инерции ротора турбоагрегата, величина постоянная для турбогенератора, определяется весом ротора.

ω - угловая скорость вращения.

$$\text{при этом } M_T = M_{T0} + \Delta M_T; M_G = M_{G0} + \Delta M_{G2}$$

Вычтем почленно из уравнения (3-20) уравнение (3-19), тогда уравнение движения ротора турбогенератора примет вид

$$J \frac{d\omega}{dt} = \Delta M_T - \Delta M_G \quad (3-21)$$

Момент движущих сил на лопатках турбоагрегата можно рассматривать как функцию

$$M_T = f(P_1, T_1, P_k, m, \omega)$$

где P_1, T_1 - параметры пара перед турбиной, P_k - давление пара в конденсаторе турбины, m - величина открытия регулировочных клапанов турбины, ω - угловая скорость вращения ротора турбины.

Момент сил сопротивления на валу генератора - M_G зависит от скорости вращения вала, а так же суммарного электрического сопротивления, подключенного к генератору. Поскольку это сопротивление может меняться произвольно, то зависимость является случайной функцией времени. Поэтому общее изменение момента M_G можно представить в виде $\Delta M_G = \Delta M_G(\omega) + \Delta M_G(t)$,

где $\Delta M_G(\omega)$ - изменение момента в зависимости от скорости вращения ротора турбоагрегата при постоянном сопротивлении сети,

$\Delta M_G(t)$ - изменение момента в зависимости от сопротивления сети при постоянной скорости вращения ротора.

Допустим, что параметры пара P_1, T_1, P_k не меняются, то есть изоэнтропийный перепад энтальпий (теплоперепад) в процессе расширения пара в проточной части турбины не изменен, тогда $M_T = f(m, \omega)$. Разложим функции M_T и M_G в ряд по степеням независимых переменных (ряд Тэйлора), оставив в нем только члены ряда, содержащие отклонения не выше первой.

$$\Delta M_T = \left(\frac{\partial M_T}{\partial m}\right)_0 \cdot \Delta m + \left(\frac{\partial M_T}{\partial \omega}\right)_0 \cdot \Delta \omega,$$

$$\Delta M_G = \left(\frac{\partial M_G}{\partial \omega}\right)_0 \cdot \Delta \omega + \Delta M_G(t).$$

В результате уравнение ротора турбоагрегата с учетом малых отклонений независимых переменных от установившегося состояния примет вид

$$J \frac{d(\Delta \omega)}{dt} = \left(\frac{\partial M_T}{\partial m}\right)_0 \cdot \Delta m + \left(\frac{\partial M_T}{\partial \omega}\right)_0 \cdot \Delta \omega - \left(\frac{\partial M_G}{\partial \omega}\right)_0 \cdot \Delta \omega - \Delta M_G(t), \quad (3-22)$$

Перейдем в этом уравнении к относительным величинам независимых переменных, выбрав в качестве базовых ω_0 - номинальное значение угловой скорости вращения ротора турбоагрегата, $m_{\text{макс}}$ - максимальное перемещение регулировочного клапана турбоагрегата, соответствующее изменению нагрузки турбоагрегата от холостого хода до максимальной.

$M_{G\text{макс}}$ - максимальный момент сил сопротивления на валу генератора.

$$\text{Обозначим } \frac{\Delta \omega}{\omega_0} = \varphi; \frac{m}{m_{\text{макс}}} = \mu; \frac{\Delta M_G(t)}{M_{G\text{макс}}} = \lambda$$

Тогда уравнение (3-22) в относительных величинах независимых переменных будет:

$$J \omega_0 \frac{d\varphi}{dt} = \left(\frac{\partial M_T}{\partial m}\right)_0 m_{\text{макс}} \mu + \left(\frac{\partial M_T}{\partial \omega}\right)_0 \cdot \omega_0 \varphi - \left(\frac{\partial M_G}{\partial \omega}\right)_0 \cdot \omega_0 \varphi - \frac{\Delta M_G(t)}{M_{G\text{макс}}} M_{G\text{макс}}, \quad (3-23).$$

Разделим переменные

$$J\omega_0 \frac{d\varphi}{dt} + \left[\left(\frac{\partial M_T}{\partial \omega} \right)_0 - \left(\frac{\partial M_T}{\partial \omega} \right)_0 \right] \cdot \omega_0 \varphi = \left(\frac{\partial M_T}{\partial m} \right)_0 \cdot m_{\text{макс}} \mu - M_{T\text{макс}} \lambda, \quad (3-24)$$

здесь $J\omega_0$; $\left[\left(\frac{\partial M_T}{\partial \omega} \right)_0 - \left(\frac{\partial M_T}{\partial \omega} \right)_0 \right] \cdot \omega_0$; $\left(\frac{\partial M_T}{\partial m} \right)_0 \cdot m_{\text{макс}}$; $M_{T\text{макс}}$ - постоянные

коэффициенты при независимых переменных.

Обозначим: $T = \frac{J}{\left[\frac{\partial M_T}{\partial \omega} - \frac{\partial M_T}{\partial \omega} \right]}$; $T_\mu = \frac{J \omega_0}{\left(\frac{\partial M_T}{\partial m} \right)_0 m_{\text{макс}}}$; $T_\lambda = \frac{J \omega_0}{M_{T\text{макс}}}$

Уравнение (3-24) примет вид:

$$\frac{d\varphi}{dt} + \frac{\varphi}{T} = \frac{\mu}{T_\mu} - \frac{\lambda}{T_\lambda}, \quad (3-25)$$

$$\text{или } T \frac{d\varphi}{dt} + \varphi = \tau_1 \mu - \tau_2 \lambda, \quad (3-26)$$

где $\tau_1 = \frac{T}{T_\mu}$; $\tau_2 = \frac{T}{T_\lambda}$;

T - динамическая постоянная ротора турбоагрегата, имеет размерность времени.

τ - безразмерные коэффициенты, которые не содержат момента инерции ротора и характеризуют статические свойства системы.

Уравнение (3-26) в операторной форме:

$$(Tp + 1)\varphi = \tau_1 \mu - \tau_2 \lambda, \quad (3-27)$$

Или в изображениях по Лапласу

$$(Ts + 1)\bar{\varphi} = \tau_1 \bar{\mu} - \tau_2 \bar{\lambda}. \quad (3-28)$$

Частные производные в составе постоянных коэффициентов уравнения (3-24) могут быть определены либо аналитически, либо из графиков статических характеристик в предположении постоянного значения всех независимых переменных, кроме той, по которой вычисляется производная.

Так $\left(\frac{\partial M_T}{\partial \omega} \right)_0$ вычисляется в предположении $m = \text{idem}$

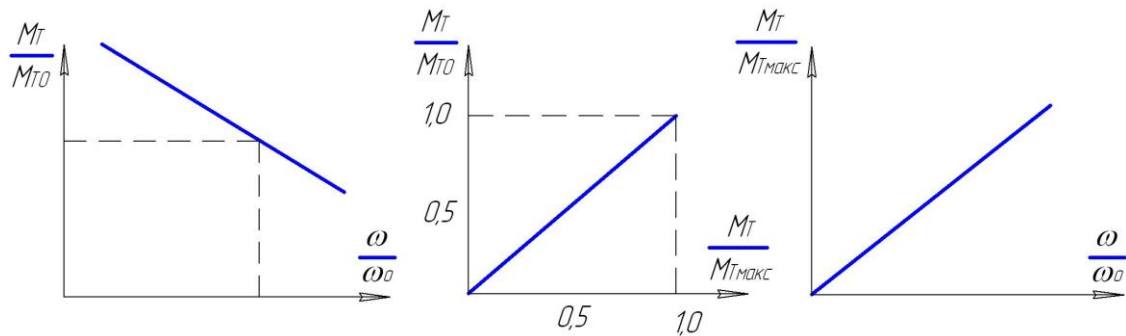


Рис. 3.2. Статические характеристики турбогенератора а) $M_T = f(\omega)$, б) $M_T = f(m)$, в) $M_T = f(\omega)$

$$\frac{\partial M_T}{\partial \omega} \approx -\frac{M_T}{\omega_0}; \text{ т.к. } M_T = \frac{N_0}{\omega_0}, \text{ то } \frac{\partial M_T}{\partial \omega} = -\frac{N_0}{\omega_0^2};$$

$$\frac{\partial M_T}{\partial \omega_0} \approx -\frac{M_T}{\omega_0} \approx \frac{N_0}{\omega_0^2}; \text{ т.к. } M_T = \frac{N_0}{\omega_0}$$

Подставив в формулу определения T известные для данного типа турбин значение J, ω_0, N_0 находят динамическую постоянную ротора турбины.

$$T = \frac{J}{\frac{N_0}{\omega_0^2} + \frac{N_0}{\omega_0^2}} = \frac{J\omega_0^2}{2N_0}$$

T -время достижения ротором двойной частоты вращения при полном сбросе нагрузки с постоянным ускорением, равным начальному значению.

Примем характеристику регулировочных органов турбоагрегата (Рис. 3-2,б) линейной, тогда

$$\frac{\partial M_T}{\partial m} \cdot m_{\max} = \frac{M_{T_0}}{m} \cdot m_{\max} = M_0 = \frac{N_0}{\omega_0}.$$

Подставив найденные значения частных производных в формулы расчета T_μ и T_λ получают:

$$T_\mu = \frac{J\omega_0^2}{N_0}, \quad T_\lambda = \frac{J\omega_0}{M_{T_{\max}}} = \frac{J\omega_0}{\frac{N_0}{\omega_0}} = \frac{J\omega_0^2}{N_0},$$

т.е. $T_\mu = T_\lambda$, а значит $\tau_1 = \frac{T}{T_\mu} = 0,5$, $\tau_2 = 0,5$.

В уравнении (3-25) член уравнения $\frac{\varphi}{T}$ выражает свойства саморегулирования ротора турбоагрегата как объекта регулирования.

Уравнение емкости - резервуар неизменной вместимости.

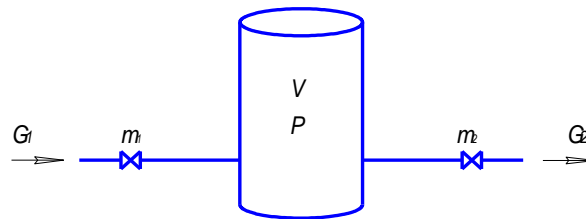


Рис. 3.3. Схема резервуара для газа.

V -емкость резервуара, заполненного газом, G_1 - количество притекающего газа, G_2 - количество вытекающего газа, m_1, m_2 - координаты, определяющие положение распределительных органов- задвижек резервуара на входе и выходе газа, P - давление газа в резервуаре.

1. В установившемся режиме

$$G_{10} - G_{20} = 0. \quad (3-29)$$

2. При нарушении равенства расходов путем воздействия на распределительные органы согласно закону сохранения материи

$$G_1 - G_2 = V \frac{d\rho}{dt}, \quad (3-30)$$

где $G_1 = G_{10} + \Delta G_1$, $G_2 = G_{20} + \Delta G_2$

Предположим, что в неравновесных процессах состояние газа в резервуаре изменяется политропно: $P\rho^{-n} = P_0\rho_0^{-n}$, n -показатель политропы.

Продифференцировав уравнение политропы, получим

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\rho_0}{nP_0} \frac{dP}{dt} \text{ и подставим в уравнение (3-30)}$$

Для малых отклонений независимых переменных уравнение (3-30) станет

$$\frac{V\rho_0}{nP_0} \frac{dP}{dt} = \Delta G_1 - \Delta G_2 \quad (3-31)$$

где $V\rho_0 = D_0$ -массовый вес газа.

Предположим: $G_1 = f(m_1, P)$, $G_2 = f(m_2, P)$,

тогда для малых колебаний имеем

$$\Delta G_1 = \left(\frac{\partial G_1}{\partial m}\right)_0 \Delta m_1 + \left(\frac{\partial G_1}{\partial P}\right)_0 \Delta P$$

$$\Delta G_2 = \left(\frac{\partial G_2}{\partial m}\right)_0 \Delta m_2 + \left(\frac{\partial G_2}{\partial P}\right)_0 \Delta P$$

Подставив выражения для ΔG_1 и ΔG_2 в уравнение (3-31) и представив переменные в относительных величинах, получим уравнение газового объема

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{\rho}{R} = \frac{\mu_1}{R_1} - \frac{\mu_2}{R_2}, \quad (3-32)$$

$$\text{где } \mu_1 = \frac{\Delta m_1}{m_{\text{макс}}}; \mu_2 = \frac{\Delta m_2}{m_{\text{макс}}}; D = \frac{\Delta D}{D_0}$$

$$\text{или в операторной форме } (Rp + 1)\rho = \tau_1\mu_2 - \tau_2\mu_2 \quad (3-33)$$

R -динамическая постоянная для емкости, τ_1 и τ_2 - коэффициенты

$$\tau_1 = \frac{R}{R_1}; \tau_2 = \frac{R}{R_2}.$$

$$R = \frac{D_0}{n\left[\left(\frac{\partial G_2}{\partial P}\right)_0 - \left(\frac{\partial G_1}{\partial P}\right)_0\right]P_0}; R_1 = \frac{D_0}{n\left(\frac{\partial G_1}{\partial m_1}\right)_0 m_{1\text{макс}}}; R_2 = \frac{D_0}{n\left(\frac{\partial G_2}{\partial m_2}\right)_0 m_{2\text{макс}}}.$$

Частные производные для постоянных коэффициентов уравнения (3-33) и находят по статическим характеристикам ОР, как ОР давления газа (Рис.3.4) и характеристика для регулировочных задвижек. (Рис. 3.5)

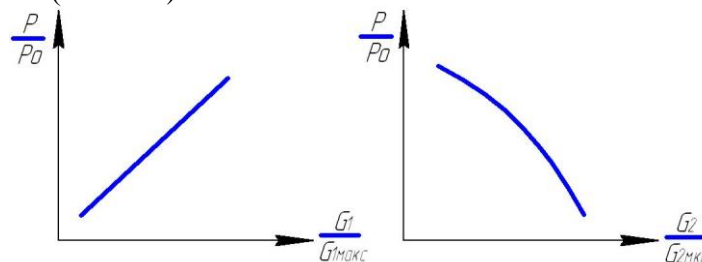


Рис. 3.4. Статические характеристики резервуара газа.

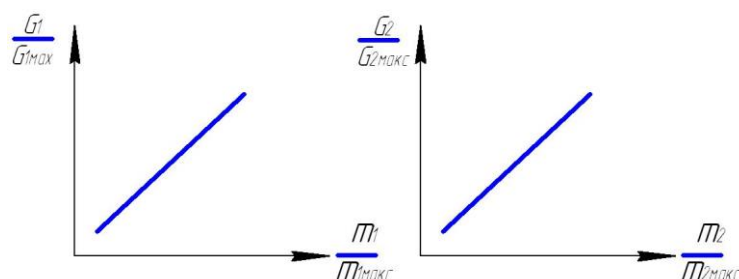


Рис. 3.5. Статические характеристики регулировочных органов.

Элементы, из которых составлена система регулирования могут существенно различаться по физической природе протекающих процессов, но сами процессы при этом будут описываться одинаковыми дифференциальными уравнениями. Сходство дифференциальных уравнений означает, что рассматриваемые объекты (элементы) математически подобны и что они обладают одинаковыми или близкими динамическими свойствами.

ГЛАВА 4. ТИПОВЫЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЗВЕНЬЯ И СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ АСР.

Динамические свойства всех элементов АСР полностью отражают следующие типы элементарных звеньев: кинематическое, аperiodическое, колебательное, интегрирующее и дифференциальное, а так же звено с запаздыванием.

Уравнение звена связывает его входной и выходной параметр. При этом подразумевается, что звено есть элемент направленного действия, то есть изменение входной параметр вызывает появление выходного сигнала, при этом обратное влияние отсутствует.

Заменяя реальный элемент АСР одним или определенной комбинацией элементарных типовых звеньев, получают динамическую модель АСР, дифференциальные уравнения которой известны или могут быть получены.

Принято записывать дифференциальные уравнения в операторной форме, используя символ – оператор дифференцирования $p = \frac{d}{dt}$. Например, дифференциальное уравнение

движения системы

$$a_0 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_2 y = b_0 \frac{df}{dt} + b_1 x, \quad (4-1)$$

в операторной форме

$$a_0 p^2 y + a_1 p y + a_2 y = b_0 p x + b_1 x \quad (4-2)$$

$$\text{или } (a_0 p^2 + a_1 p + a_2) y = (b_0 p + b_1) x \quad (4-3)$$

в общем виде

$$D(p) y(t) = M(p) x(t) \quad (4-4)$$

где $D(p) = a_0 p^2 + a_1 p + a_2$ - собственный оператор.

$M(p) = b_0 p + b_1$ -входной оператор.

В результате создается структурная эквивалентная схема АСР, в которой представлены типовые элементарные звенья направленного действия, между которыми установлены динамические связи.

4.1 Типовые элементарные звенья.

Кинематическое звено, оно же усилительное, пропорциональное, статическое.

$$\text{Уравнение звена } y_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}} \quad (4-5)$$

Разгонная характеристика звена при ступенчатом входном воздействии $x_{\text{вх}} = 1(t)$ (Рис. 4.1).

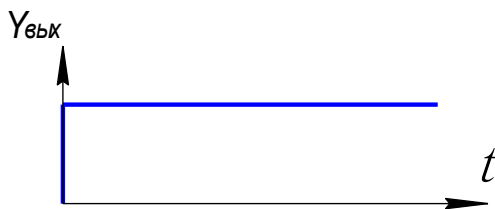


Рис 4.1 разгонная характеристика звена.

$$\text{Передаточная функция } W(p) = k. \quad (4-6)$$

Пример: рычажная связь.

Апериодическое (инерционное звено 1-го порядка).

$$\text{Уравнение звена } (Tp + 1)y_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}}. \quad (4-7)$$

Разгонная характеристика (Рис. 4.2).

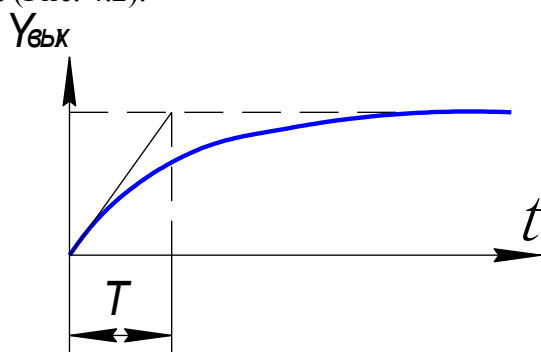


Рис 4.2 Разгонная характеристика звена.

$$\text{Передаточная функция } W(p) = \frac{k}{Tp + 1}. \quad (4-8)$$

Пример: одноемкостной регулируемый объект-ротом турбоагрегата, резервуар постоянной емкости.

Колебательное (инерционное звено 2-ого порядка).

$$\text{Уравнение звена } (Tp^2 + T_1p + 1)y_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}}. \quad (4-9)$$

Разгонные характеристики (Рис. 4.3).

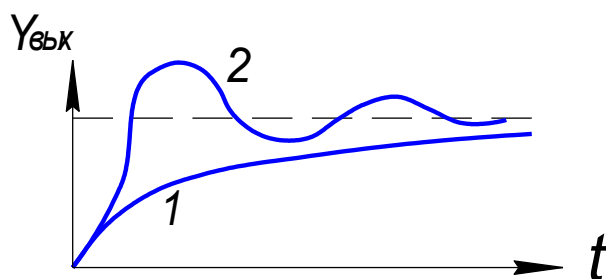


Рис 4.3 Разгонные характеристики звена.

1-корни характеристического уравнения вещественные: $p_1 = -\alpha_1$, $p_2 = -\alpha_2$;
 2-корни комплексные сопряженные: $p_{1,2} = -\alpha \pm i\beta$.

Передаточная функция $W(p) = \frac{k}{Tp^2 + T_1p + 1}$. (4-10)

Инерционное звено второго порядка образуется при наличии двух последовательно соединенных емкостей - апериодических звеньев.

Интегрирующее (интегральное, астатическое) звено.

Уравнение звена $T_p y_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}}$. (4-11)

Разгонная характеристика (Рис. 4.4).

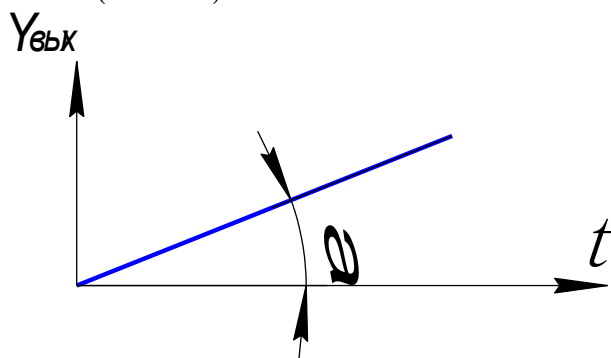


Рис 4.4 Разгонная характеристика звена.

Передаточная функция $W(p) = \frac{k}{Tp}$. (4-12)

Пример: Гидравлический сервомотор (элемент АСР турбин).

Дифференцирующее звено.

Уравнения звена:

а) $y_{\text{вых}} = kT_p x_{\text{вх}}$ (4.13), б) $y_{\text{вых}} = k(T_p + 1)x_{\text{вх}}$ (4.14) – идеальные звенья;

в) $(Tp + 1)y_{\text{вых}} = kT_p x_{\text{вх}}$ (4.15) – реальное звено.

Разгонная характеристика (Рис. 4.5)

Реальное дифференциальное звено обладает инерцией в изменении $y_{\text{вых}}(t)$ по сравнению с входным сигналом.

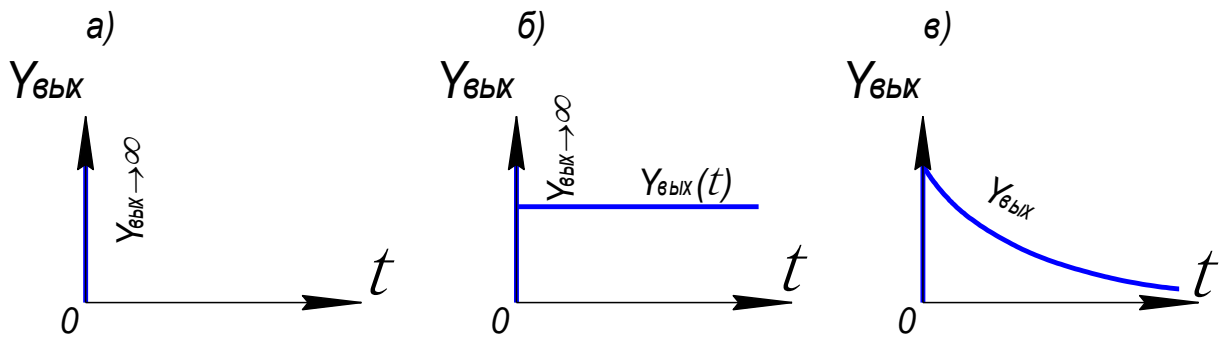


Рис 4.5 Разгонные характеристики звена: а,б - идеальное звено, в – реальное звено.

Передаточные функции:

а) $W(p) = kTp$ (4-16), б) $W(p) = k(Tp + 1)$ (4-17), в) $W(p) = \frac{kTp}{Tp + 1}$ (4-17)

Пример: Элемент АСР- дифференциатор; RC- цепочка. (Рис. 4.6)

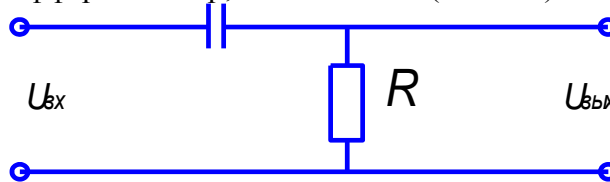


Рис 4.6 RC – цепочка – реальное дифференцирующее звено.

Звено запаздывания.

Уравнение звена:

- а) $y_{\text{вых}}(t) = 0$, при $t \leq \tau$,
 б) $y_{\text{вых}}(t) = x_{\text{вых}}(t)$, при $t \geq \tau$,

τ - время запаздывания выходного сигнала

Разгонная характеристика (Рис. 4.7)

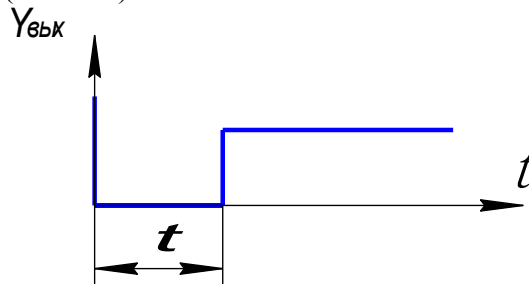


Рис 4.7 Разгонная характеристика звена.

Пример: транспортный участок - ленточный транспортер, участок трубопровода.

4.2 Структурные схемы и типы соединения звеньев.

Элементы АСР, соединенные определенным образом, образуют динамическую систему. Используя типовые звенья создают структурную схему АСР.

Разомкнутые структурные схемы. Различают три типа соединения звеньев: последовательное, параллельно-прямое, параллельно- обратное. (Рис. 4.8.)

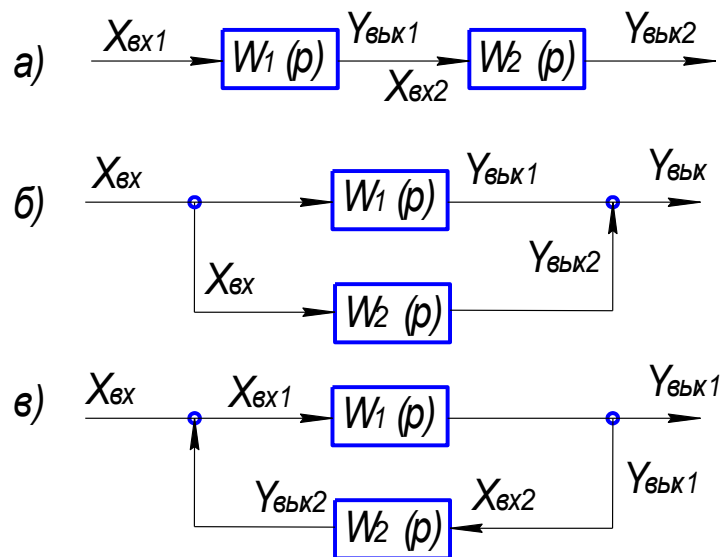


Рис. 4.8. Виды соединения звеньев
 а) последовательное, б) параллельно-прямое, в) параллельно-обратное.

Структурные схемы, состоящие только из последовательно включенных звеньев - одноконтурные. Структурные схемы, имеющие параллельное соединение звеньев будут многоконтурными.

Выделенная цепь звеньев может заменяться одним эквивалентным звеном, имеющим передаточную функцию цепи.

Последовательное соединение звеньев (Рис. 4.8,а)

$$\text{Уравнение 1-ого звена } y_{вых1} = W_1(p)x_{вх1}$$

$$\text{Уравнение 2-ого звена } y_{вых2} = W_2(p)x_{вх2}$$

$$y_{вых1} = x_{вх2}$$

$$\text{Передаточная функция структуры } W(p) = \frac{y_{вых2}}{x_{вх1}}$$

Подставим в уравнение второго звена уравнение первого звена

$$y_{вых2} = W_1(p) \cdot W_2(p)x_{вх1}, \text{ тогда } W(p) = W_1(p) \cdot W_2(p)$$

Таким образом, передаточная функция цепи, состоящая из нескольких последовательно соединенных звеньев, равна произведению передаточных функций звеньев этой цепи.

Параллельно-прямое соединение звеньев (Рис. 4.8, б)

$$y_{вых} = (y_{вых1} + y_{вых2})$$

$$y_{вых1} = W_1(p)x_{вх}$$

$$y_{вых2} = W_2(p)x_{вх}$$

$$y_{вых} = [W_1(p) + W_2(p)]x_{вх}$$

Передаточная функция структуры:

$$W(p) = \frac{y_{вых}}{x_{вх}}, \text{ тогда } W(p) = W_1(p) + W_2(p).$$

Таким образом, передаточная функция группы звеньев при параллельно-прямом соединении равна сумме передаточных функций звеньев, входящих в это соединение.

Обратно-параллельное соединение звеньев (Рис. 4.8, в)

$$x_{вх1} = x_{вх} \pm y_{вых2}$$

знак (+)- усиливает, а (-)- ослабляет сигнал на звено $W_1(p)$.

$$x_{ex2} = y_{вых1}$$

$$y_{вых1} = W_1(p)x_{ex1} = W_1(p)(x_{ex} \pm y_{вых2}) \quad (a)$$

$$y_{вых2} = W_2(p)y_{вых1} \quad (б)$$

Поделим левую и правую части уравнения (а) на $y_{вых1}$

$$\frac{y_{вых1}}{y_{вых1}} = W_1(p) \frac{x_{ex} \pm y_{вых2}}{y_{вых1}}, \text{ и подставив уравнение (б), получим}$$

$$1 = W_1(p) \frac{x_{ex} \pm W_2(p)y_{вых1}}{y_{вых1}} \quad (в)$$

Числитель правой части этого уравнения почленно разделим на знаменатель $y_{вых1}$

$$1 = W_1(p) \left[\frac{1}{W(p)} \pm W_2(p) \right] \text{ или } 1 = \frac{W_1(p)}{W(p)} \pm W_1(p)W_2(p) \quad (г);$$

Перенесем в левую часть уравнения (г) произведение передаточных функций $W_1(p) \cdot W_2(p)$

$$1 \pm W_1(p) \cdot W_2(p) = \frac{W_1(p)}{W(p)}$$

$$\text{В результате } W(p) = \frac{W_1(p)}{1 \pm W_1(p)W_2(p)} \quad (д).$$

Здесь знак (+) обозначает сигнал отрицательной обратной связи звена $W_2(p)$, а знак (-) – положительной обратной связи.

При отсутствии звена обратной связи, передаточная функция структуры с отрицательной обратной связью будет

$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 + W_1(p)}$$

Замкнутые структурные схемы. Для АСР при управляющем и возмущающем воздействиях образуются структурные схемы, изображенные на рис. 4.9.

При управляющем воздействии (Рис. 4.9, а) передаточная функция замкнутой АСР

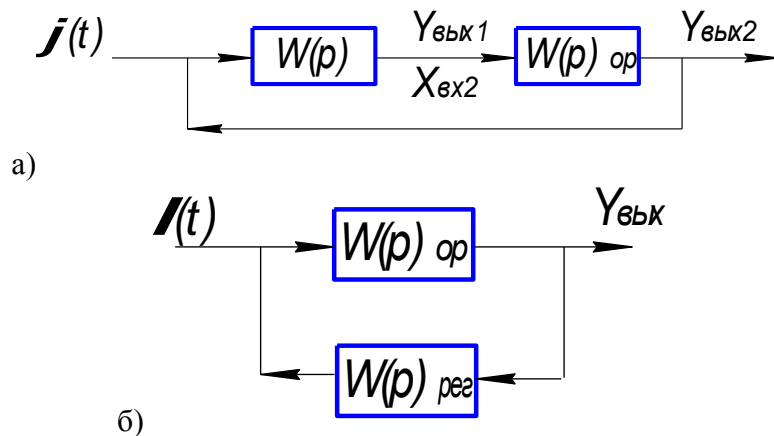


Рис. 4.9 Замкнутые структурные схемы: а) при управляющем воздействии $\varphi(t)$, б) при возмущающем воздействии $\lambda(t)$

ГЛАВА 5. УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Всякая АСР, которая подвергается внешнему воздействию, отклоняется от заданного ей закона движения. При этом регулятор стремится вернуть систему к этому движению. В результате под влиянием воздействий, с одной стороны, и восстанавливающего действия регулятора, с другой, возникает переходный процесс.

В этой ситуации возможны три случая:

1) система регулирования не может восстановить требуемого движения после его нарушения и действительное движение системы будет все дальше удаляться от требуемого. Такой переходный процесс называется расходящимся, а система – неустойчивой.

2) система регулирования после нарушения движения воздействиями с течением времени возвращается к заданному движению с точностью, отвечающей статической неравномерности (ошибки) системы регулирования. Такой переходный процесс будет сходящимся, а система – устойчивой.

3) система регулирования после нарушения равновесного режима получает дополнительно к заданному движению еще и установившееся периодическое движение, которое представляет собой незатухающие колебания. Такой переходный процесс называется незатухающим колебательным, а система находящейся на границе устойчивости.

Движение большинства реальных АСР описывается нелинейными дифференциальными уравнениями, которые для упрощения исследования АСР могут быть линеаризованы. На их основе составляется дифференциальное уравнение замкнутой системы с регулируемой величиной $y(t)$ в качестве переменной

$$a_0 \frac{d^n y}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_n y = F(x), \quad (5-1)$$

которое представляет собой неоднородное дифференциальное уравнение, характеризующее динамические свойства системы при наличии в ней внешних воздействий.

Решение этого уравнения можно представить в виде двух составляющих.

$$y(t) = y_{\bar{n}\bar{a}}(t) + y_{\hat{a}\hat{i}}(t) \quad (5-2)$$

описывающих свободные и вынужденные колебания системы, при этом $y_{\hat{a}\hat{i}}(t)$ определяется неснимающимся воздействием, приложенным к АСР.

Для получения решения уравнения (5-1) достаточно к какому-либо частному решению прибавить общее решение однородного с ним уравнения, т.е. уравнения (5-1) в котором $F(x) = 0$.

Его характеристическое уравнение в операторной форме имеет вид:

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n = 0, \quad (5.3)$$

где p - корни характеристического уравнения.

Оно получается, если приравнять нулю собственный оператор – оператор левой части неоднородного дифференциального уравнения $D(p) = 0$. Для замкнутой системы при отсутствии внешнего воздействия характеристическое уравнение может быть получено по

передаточной функции системы $W(p) = \frac{M(p)}{D(p)}$

$$W(p) + 1 = 0 \quad (5.4)$$

При исследованиях устойчивости динамической системы в уравнение движения не вводится внешнее воздействие $F(x_{\text{вн}}) = 0$, а рассматриваются собственные колебания системы относительно состояния установившегося движения.

Такое исследование принято называть исследованием в малом, в отличие от исследования в большом, когда анализируется поведение системы при достаточно больших отклонениях регулируемой величины от заданного значения.

Решению задач об устойчивости систем посвящено большое количество трудов многих выдающихся ученых, среди которых первое место по праву принадлежит русскому математику Александру Михайловичу Ляпунову, создавшего общий метод решения задач об устойчивости.

5.1 Теорема Ляпунова.

А.М. Ляпунов при исследовании устойчивости динамических систем пришел к следующим выводам относительно законности использования линеаризованных дифференциальных уравнений для суждения об устойчивости действительной системы в малом.

1) Если характеристическое уравнение линеаризованной системы имеет все корни с отрицательными вещественными частями, то действительная система будет устойчива. При этом никакие отброшенные при линеаризации уравнения члены второй и высших степеней отклонения регулируемого параметра не могут изменить устойчивость системы.

2) Если характеристическое уравнение линеаризованной системы имеет хотя бы один корень с положительной вещественной частью, то действительная система будет неустойчива. При этом никакие отброшенные при линеаризации члены второй и высших степеней отклонения регулируемого параметра не могут придать устойчивость системе.

3) Если характеристическое уравнение линеаризованной системы имеет хотя бы один нулевой корень или пару чисто мнимых сопряженных корней, то поведение действительной системы не может определяться ее линеаризованным уравнением. В этих случаях отброшенные при линеаризации уравнения члены вторых и высших степеней отклонения регулируемого параметра коренным образом изменяют описание динамического процесса реальной системы.

Следует отметить, что приведенная теорема Ляпунова об устойчивости линеаризованных систем справедлива только тогда, когда у нелинейной системы функция, выражающая зависимость регулируемой величины от переменных параметров имеет конечные, непрерывные и однозначные производные в окрестности точки, относительно которой исследуется процесс регулирования.

Если динамика системы точно описывается линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами, то устойчивость в малом обеспечивает неограниченную устойчивость системы, т.е. устойчивость в большом независимо от величины отклонения.

Относительно систем, движение которых описывается нелинейными дифференциальными уравнениями, этого сказать нельзя. Возможны случаи, когда система, устойчивая в малом, оказывается неустойчивой в большом. Поэтому методы исследования устойчивости нелинейных систем существенно отличаются от методов исследования линейных систем.

Если отложить в прямоугольных координатах плоскости корни по оси абсцисс вещественные части, а по оси ординат – коэффициенты при мнимых частях корней характеристического уравнения, то в этой плоскости каждому корню будет соответствовать точка. Вещественные корни определяют точки на оси абсцисс, а пара сопряженных комплексных корней две точки, расположенные симметрично относительно оси абсцисс.

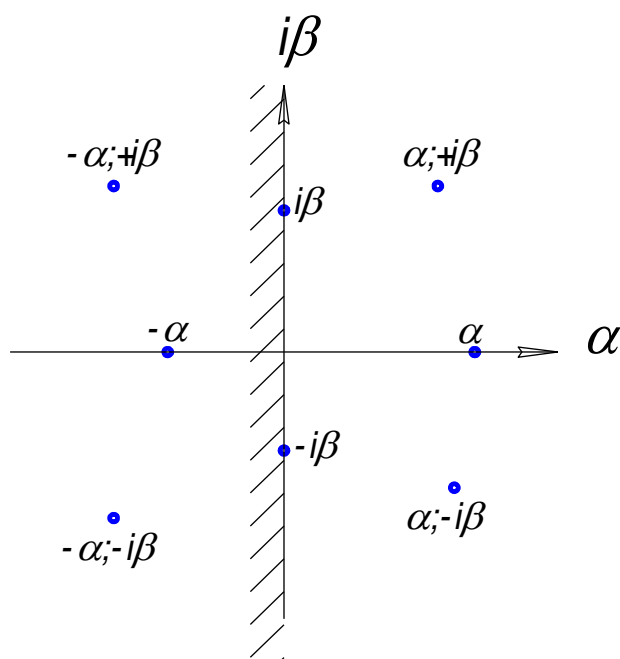


Рис 5.1 Плоскость корней характеристического уравнения.

- 1) $p = \pm\alpha$, 2) $p = \pm i\beta$, 3) $p = \pm\alpha \pm i\beta$

Таким образом, для того чтобы действительная система была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы корни характеристического уравнения линеаризованной системы находились в комплексной плоскости корней слева от мнимой оси. Если хотя бы одна точка лежит на мнимой оси, то система находится на границе устойчивости. Следовательно, для суждения об устойчивости АСР нет необходимости вычислять все корни характеристического уравнения, достаточно лишь выяснить, все ли они расположены слева от мнимой оси.

Однако уравнения степени выше четвертой не решаются в радикалах. Таким образом, возникает необходимость иметь признаки, которые позволили бы без решения характеристического уравнения, во-первых, проверить устойчивость конкретной АСР, а во-вторых, определили бы необходимые и достаточные условия для того чтобы переходные процессы в АСР протекали устойчиво.

При исследовании устойчивости возможны две постановки задачи для определения устойчивости системы. Первая сводится к тому, что если известны все заданные конструктивные и настроечные параметры системы, то нужно определить будет ли система устойчива. Решение этой задачи достигается с помощью использования критериев устойчивости.

Вторая постановка предполагает известными некоторые параметры, например, конструктивные. Решение этой задачи сводится к определению пределов изменения остальных параметров, например, настроечных, обеспечивающих устойчивость исследуемой системы, что достигается построение областей устойчивости.

5.2 Алгебраические критерии устойчивости.

Использование этих критериев позволяет проверить устойчивость системы, не прибегая к решению характеристического уравнения и графическим построениям, ограничиваясь лишь алгебраическими вычислениями над коэффициентами характеристического уравнения.

Критерий устойчивости Рауса.

Критерий, сформулированный английским математиком Раусом в 1875 г (1877 г) представляет собой правило, определяющее ряд последовательных алгебраических операций, необходимых для решения задачи проверки устойчивости системы.

Допустим, что характеристическое уравнение исследуемой системы будет

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + a_2 p^{n-2} + a_{n-1} p + a_n = 0 \quad (5-4)$$

Раус предложил использовать схему составления таблицы в виде таблицы коэффициентов.

Таблица 5.1

Таблица коэффициентов.

№ строки	№ столбца			
	1	2	3	4
1	a_0	a_2	a_4	a_6
2	a_1	a_3	a_5	a_7
3	$a_{31} = \frac{a_1 a_2 - a_0 a_3}{a_1}$	$a_{32} = \frac{a_1 a_4 - a_0 a_5}{a_1}$	$a_{33} = \frac{a_1 a_6 - a_0 a_7}{a_1}$	$a_{34} =$
4	$a_{41} = \frac{a_{31} a_3 - a_1 a_{32}}{a_{31}}$	$a_{42} = \frac{a_{31} a_5 - a_1 a_{33}}{a_{31}}$	$a_{43} = \frac{a_{31} a_7 - a_1 a_{34}}{a_{31}}$	a_{44}
5

Метод составления таблицы:

Первая строка - составляется из коэффициентов характеристического уравнения с четными индексами, начиная с a_0 .

Вторая строка – из коэффициентов с нечетными индексами

Третья строка получается перекрестным умножением соответствующих коэффициентов первых двух строк делением на элемент первого столбца предыдущей строки.

Все последующие строки получают аналогичным способом из двух предыдущих строк

После построения приведенной выше таблицы критерий Рауса может быть сформулирован следующим образом. Для того чтобы АСР была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы все элементы первого столбца таблицы, составленные из коэффициентов характеристического уравнения системы, были отличны от нуля и положительны при условии, что коэффициент a_0 при старшем члене уравнения больше нуля. Критерий Рауса особенно удобен в тех случаях, когда коэффициенты характеристического уравнения заданы численно.

Критерий Гурвица. Иная форма критерия устойчивости, наиболее распространенная в технической литературе, известна под названием критерия Гурвица, который сформулирован швейцарским ученым Гурвицем в 1895г. Последний основан на построении специальных определителей характеристического уравнения, называемых определителями или матрицами Гурвица.

Пусть дано характеристическое уравнение замкнутой системы, с постоянными коэффициентами a_i

$$D(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + a_2 p^{n-2} + \dots + a_n = 0, \quad (5-5)$$

у которого коэффициент при старшем члене $a_0 > 0$.

Определители Гурвица будут:

$$\Delta_1 = a_1; \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 a_3 \\ a_0 a_2 \end{vmatrix}; \Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 a_3 a_5 \\ a_0 a_2 a_4 \\ 0 \ a_1 a_3 \end{vmatrix}, \dots$$

и в общем виде

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_1 a_3 a_5 \dots 0 \\ a_0 a_2 a_4 \dots 0 \\ 0 \ a_1 a_3 \dots 0 \\ \dots \dots \dots \\ 0 \dots \dots a_n \end{vmatrix}, \text{ матрица размером } n \times n \text{-матрица Гурвица.}$$

При составлении определителя (матрицы) Гурвица n -го порядка руководствуются следующим правилом:

- 1) выписывают по главной диагонали все коэффициенты от a_1 до a_n в порядке возрастания индексов;
- 2) дополняют все столбцы определителя вверх от диагонали коэффициентами, с последовательно возрастающими, а вниз с последовательно убывающими индексами;
- 3) наибольший порядок определителя Гурвица равен степени характеристического уравнения;
- 4) на место коэффициентов, индексы которых больше n и меньше нуля, ставятся нули.
- 5) Последний определитель $\Delta_n = a_n \Delta_{n-1}$

Критерий Гурвица формируется следующим образом: для того чтобы САУ была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы все определители $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$, составленные по коэффициентам характеристического уравнения системы до n -го порядка включительно, были положительны, при этом должно быть $a_0 > 0$.

При соблюдении критерия положительности коэффициентов характеристического уравнения проверка последнего определителя Гурвица Δ_n необязательна т.к. при $\Delta_{n-1} > 0$ всегда следует, что $\Delta_n > 0$.

Алгебраические критерии дают весьма простой способ исследования устойчивости систем в тех случаях, когда степень характеристического уравнения высока (например, $n > 5$) и коэффициенты его заданы численно.

Для систем, характеристические уравнения которых имеют низкую степень ($n \leq 4$), условия устойчивости можно записать в общей форме в виде простых буквенных неравенств.

Условия устойчивости для систем с характеристическим уравнениями 2-ой, 3-ей и 4-ой степеней, вытекающие из критериев Рауса и Гурвица.

$$n = 2, \ a_0 > 0; \ a_1 > 0; \ a_2 > 0.$$

$$n = 3, \ a_0 > 0; \ a_1 > 0; \ a_2 > 0 \text{ - основное неравенство,}$$

$$\text{дополнительное неравенство } a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0.$$

$$n = 4, \ a_0 > 0; \ a_1 > 0; \ a_2 > 0; \ a_3 > 0; \ a_4 > 0 \text{ - основное неравенство}$$

дополнительное неравенство

$$a_1 a_2 a_3 - a_0 a_3^2 - a_1^2 a_4 > 0$$

При $n \geq 5$ число подобных дополнительных неравенств возрастает.

Если приравнять Δ_n к нулю, то получим уравнение границ устойчивости

$$a_n = 0; \ \Delta_{n-1} = 0$$

Первая граница $a_n = 0$ соответствует наличию у характеристического уравнения нулевого корня ($p = 0$). Вторая граница $a_{n-1} = 0$ соответствует наличию у характеристического уравнения чисто мнимых корней ($p = \pm i\beta$).

5.3 Критерий устойчивости Михайлова.

Рассмотрим характеристическое уравнение замкнутой системы n -ой степени с действительными коэффициентами.

$$D(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_0 = 0 \quad (5-7)$$

где p_1, p_2, \dots, p_n - корни этого уравнения.

На комплексной плоскости корней (Рис. 5.1) каждому корню соответствует вполне определенная точка или две точки для сопряженных корней.

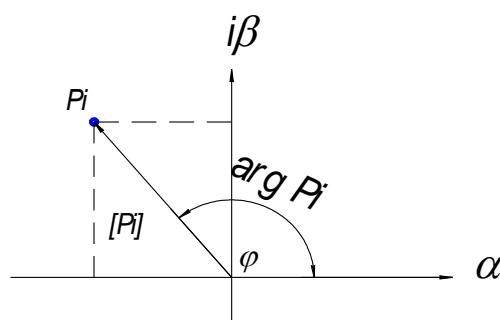


Рис 5.1 Комплексная плоскость корней.

Теоретически каждый корень p_i изображается в виде вектора, проведенного из начало координат в точке p_i . Длина этого вектора равна модулю комплексного числа $|p_i|$, а угол, образованный вектором с положительным направлением действительной оси, аргументу или фазе комплексного числа $p_i - \arg p_i$.

Изменение положения корня в плоскости комплексного переменного ведет к изменению аргумента- $\Delta \arg$.

Положив $p = i\omega$ в характеристическом уравнении $D(p) = 0$, получим изменение аргумента вектора $D(i\omega) - \Delta \arg D(i\omega)$.

Если все корни характеристического уравнения находятся слева от мнимой оси, то согласно теореме Ляпунова система будет устойчива, а при изменении частот (ω) вектор $D(i\omega)$ будет поворачиваться в положительном направлении – против часовой стрелки. При изменении частот от $-\infty$ до ∞ изменение вектора будет равно $\frac{\Delta \arg D(i\omega)}{0 \leq \omega \leq \infty} = n\pi$,

где n - степень характеристического уравнения $D(p) = 0$, определяющая число его корней, $n\pi$ - наибольшее изменение аргумента $D(i\omega)$.

При изменении ω от $-\infty$ до ∞ вектор $D(i\omega)$ на плоскости комплексного переменного описывает своим концом кривую, которая называется характеристической кривой или годографом вектора $D(i\omega)$.

Уравнение характеристической кривой можно найти, подставив $p = i\omega$ в многочлен $D(p)$.

$$D(i\omega) = a_0 (i\omega)^n + a_1 (i\omega)^{n-1} + \dots + a_{n-1} (i\omega) + a_n \quad (5-8)$$

Отделяя в нем действительную часть от мнимой, получим

$$D(i\omega) = U(\omega) + iV(\omega) \quad (5-9)$$

где $U(\omega) = a_n + a_{n-2}\omega^2 + a_{n-4}\omega^4 + \dots$ - действительная часть,

$V(\omega) = a_{n-1} + a_{n-3}\omega^3 + a_{n-5}\omega^5 + \dots$ - мнимая часть.

Действительная часть является четной функцией ω , все степени ее членов четные, начиная с нулевой (первый член a_n), а мнимая $V(\omega)$ - нечетной функцией ω .

Поэтому для отрицательных значений ω

$$D(i\omega) = U(\omega) - iV(\omega) \quad (5-10)$$

Следовательно, характеристическая кривая симметрична относительно действительной оси, поэтому при построении характеристической кривой можно ограничиться лишь положительными (ω) от 0 до ∞ , тогда угол поворота вектора $D(i\omega)$, т.е.

изменение аргумента $\frac{\Delta \arg D(i\omega)}{0 \leq \omega \leq \infty} = n \frac{\pi}{2}$, уменьшится вдвое.

Следовательно, критерий устойчивости можно сформулировать следующим образом: замкнутая АСР будет устойчива, если при возрастании ω от 0 до ∞ вектор $D(i\omega)$ повернется

в положительном направлении на угол $n \frac{\pi}{2}$, где n - степень характеристического уравнения

$D(p) = 0$ или, что то же самое, если характеристическая кривая при изменении ω от 0 до ∞ , начиная с положительной действительной оси, обходит последовательно в положительном направлении n -квадрантов комплексной плоскости.

В такой форме критерий устойчивости был предложен А.В.Михайловым в 1938 г.

Характеристическая кривая при изменении ω от 0 до ∞ будет обходить n квадрантов в положительном положении, если уравнения

$$U(\omega) = 0; V(\omega) = 0$$

имеют все действительные и перемежающиеся корни, т.е. между каждыми двумя соседними корнями уравнения $U(\omega) = 0$ лежит один корень уравнения $V(\omega) = 0$ и наоборот, между двумя соседними корнями уравнения $V(\omega) = 0$ лежит один корень уравнения $U(\omega) = 0$.

Система будет находится на границе устойчивости, если характеристическая кривая при некотором значении ω пересекает начало координат, обходя при этом $(n-1)$ квадрантов. (Рис. 5.2)

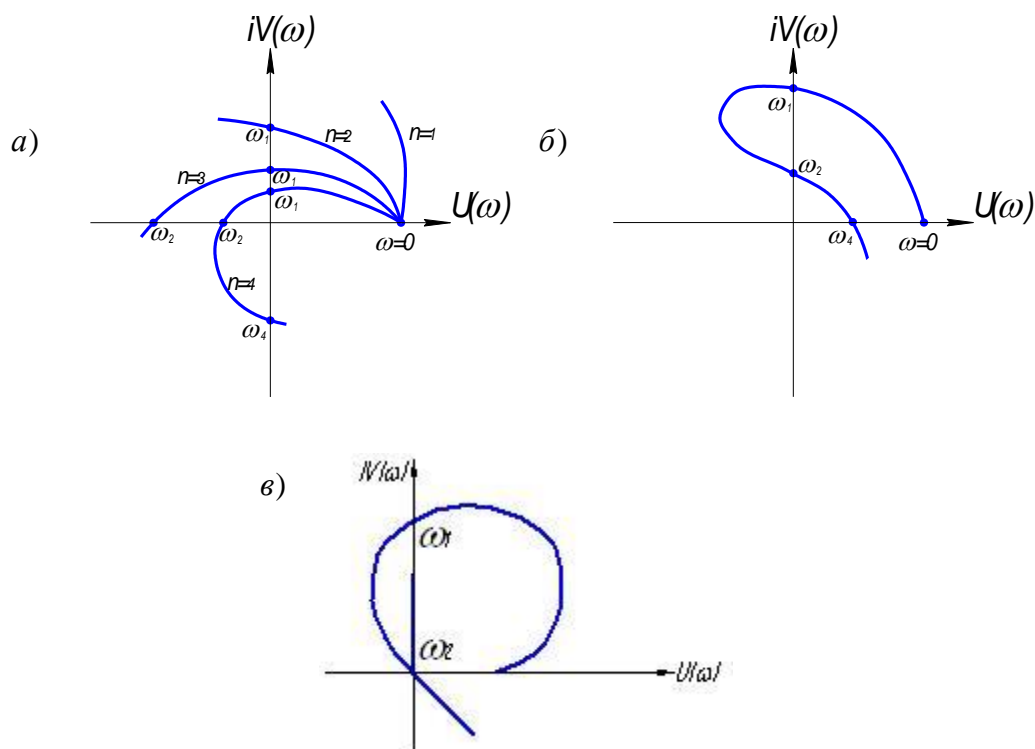


Рис 5.2 Характеристические кривые.
 а) устойчивые системы б) неустойчивая система в) система на границе устойчивости.

Свойства годографа вектора $D(i\omega)$:

1) Годограф представляет кривую, всегда симметричную относительно действительной оси комплексной плоскости. Это следует из того, что $U(\omega)$ - функция четная, а $V(\omega)$ - нечетная функция переменной ω .

2) При $\omega = 0$ годограф пересекает действительную ось в точке, отстоящей от начало координат на расстоянии, равном значению a_n -свободного члена характеристического уравнения.

3) Максимально возможное число пересечений полуветви годографа с действительной осью равно $\frac{n}{2}$, при n - четном и $\frac{n+1}{2}$, при нечетном, где n - степень характеристического уравнения.

Значение ω , отвечающее точкам пересечения годографа с вещественной осью, определяются из уравнения $V(\omega) = 0$.

4) Максимально возможное число пересечений полуветви годографа с мнимой осью равно $\frac{n}{2}$ при n - четном и $\frac{n+1}{2}$ при нечетном. Значение ω , отвечающее точкам пересечения годографа с мнимой осью, определяются из уравнения $U(\omega) = 0$.

Методы построения годографа Михайлова. 1) Характеристическая кривая строится последовательно, задаваясь значениями частот ω от 0 до ∞ в уравнения $U(\omega) = 0$ и $V(\omega) = 0$.

2) Метод контрольных точек, при котором построение характеристической кривой не обязательно. Вычисления ограничиваются нахождением только точек пересечения годографа

с осями. Расположения этих точек позволяет судить об устойчивости системы. Их находят из уравнений $U(\omega) = 0$ и $V(\omega) = 0$ и они должны быть перемежающимися.

5.4 Частотный критерий устойчивости Найквиста - Михайлова.

Частотный критерий устойчивости, первоначально разработанный в 1932 г. американским ученым Найквистом для исследования усилителей с отрицательной обратной связью, был обоснован, обобщен и впервые применен в теории автоматического регулирования А.В. Михайловым.

Частотный критерий связывает свойства разомкнутой системы со свойствами замкнутой системы.

Физический смысл критерия устойчивости Найквиста-Михайлова состоит в том, что он позволяет по годографу АФХ разомкнутой системы судить об устойчивости замкнутой системы.

Рассмотрим функцию $\varphi(i\omega)$, связанную с $W(i\omega)$ соотношением:

$$\varphi(i\omega) = 1 + W(i\omega) = \frac{D(i\omega) + M(i\omega)}{D(i\omega)} = \frac{D_3(i\omega)}{D(i\omega)} \quad (5-11)$$

Знаменатель этой функции представляет собой характеристическую кривую разомкнутой системы, а числитель – характеристическую кривую замкнутой системы.

Предположим, что разомкнутая система устойчива. Устойчивость разомкнутой системы можно установить без вычислений непосредственно по составу и характеристикам ее звеньев. Например, разомкнутая система, состоящая из устойчивых звеньев и не содержащая положительных обратных связей, заведомо устойчива.

Если разомкнутая система устойчива, то изменение аргумента $D(i\omega)$ при возрастании

$$\omega \text{ от } 0 \text{ до } \infty \text{ будет равно } \begin{matrix} \Delta \arg D(i\omega) = n \frac{\pi}{2} \\ 0 \leq \omega \leq \infty \end{matrix}$$

где n - степень характеристического уравнения разомкнутой системы, совпадающая со степенью характеристического уравнения замкнутой системы. Это следует из того, что степень числителя передаточной функции $W(p) = \frac{M(p)}{D(p)}$ в реальных системах не может превосходить степень знаменателя.

Предположим, что характеристическое уравнение замкнутой системы имеет m корней в правой части плоскости корней и, следовательно, $(m - n)$ корней в левой части комплексной плоскости корней p . (Рис. 5.3)

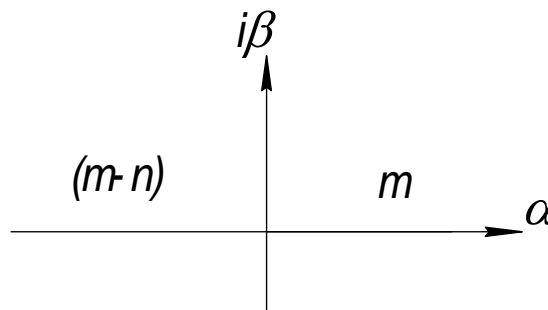


Рис. 5.3 Плоскость корней характеристического уравнения замкнутой системы.

Тогда при возрастании ω от 0 до ∞ изменение аргумента вектор $D_3(i\omega)$ будет равно

$$\Delta \arg D_3(i\omega) = (n-m)\frac{\pi}{2} - m\pi\frac{\pi}{2} = (n-2m)\frac{\pi}{2}, \quad 0 \leq \omega \leq \infty \quad (5-13)$$

Изменение аргумента функции $\varphi(i\omega) = \frac{D_3(i\omega)}{D(i\omega)}$ при возрастании ω от 0 до ∞ равно разности изменений аргумента $D_3(i\omega)$ - числителя функции $\varphi(i\omega)$ и $D(i\omega)$ - ее знаменателя,

т.е.
$$\Delta \arg \varphi(i\omega) = \Delta \arg D_3(i\omega) - \Delta \arg D(i\omega) = (n-2m)\frac{\pi}{2} - n\frac{\pi}{2} = -m\frac{\pi}{2}, \quad 0 \leq \omega \leq \infty$$

Система устойчива, если корни ее характеристического уравнения в правой части комплексной плоскости корней отсутствуют, т.е. $m = 0$, тогда $\Delta \arg \varphi(i\omega) = 0, \quad 0 \leq \omega \leq \infty$,

Это означает, что вектор функции $\varphi(i\omega)$ на комплексной плоскости опишет угол, равный нулю лишь в том случае, если годограф вектора не охватывает начало координат комплексной плоскости. (Рис. 5.4,а)

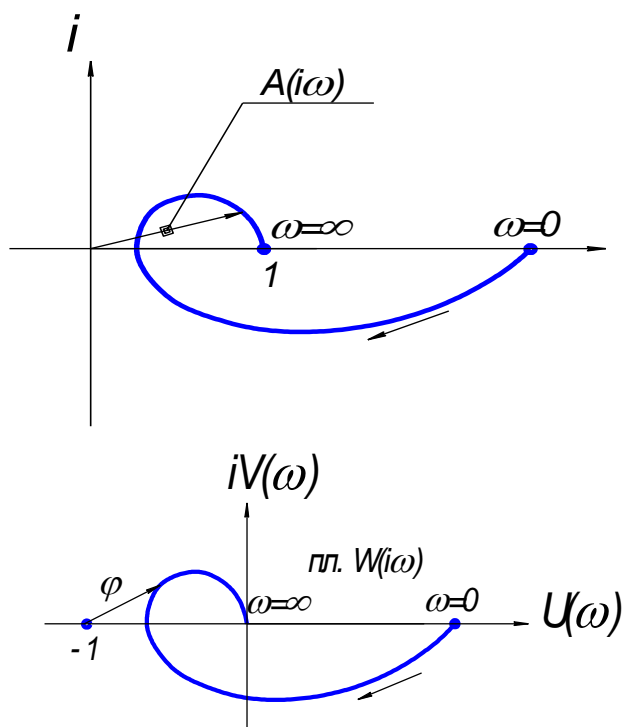


Рис. 5.4 Амплитудо-фазовые характеристики.

Но от годографа $\varphi(i\omega)$ легко перейти к годографу $W(i\omega)$, т.е. к АФХ разомкнутой системы, которая представляет ту же кривую, но сдвинутую на единицу влево. В комплексной плоскости $W(i\omega)$ начало координат находится в точке $-1, i0$, а конец вектора функции $\varphi(i\omega)$ при изменении ω скользит по АФХ разомкнутой системы. (Рис. 5.4,б)

Отсюда следует формулировка частотного критерия устойчивости: исследуемая замкнутая система, устойчивая в разомкнутом состоянии будет устойчива, если при изменении ω от 0 до ∞ АФХ разомкнутой системы в плоскости комплексного переменного $W(i\omega)$ не охватывает точку с координатами $-1, i0$.

При исследовании многоконтурных систем или систем, содержащих неустойчивые звенья, разомкнутая система может оказаться неустойчивой. Естественно, что для такой системы возможность экспериментального определения АФХ исключена, однако ее можно вычислить по уравнениям системы или передаточной функции и сделать заключение об устойчивости замкнутой системы.

В этом случае изменение аргумента $D(i\omega)$ при возрастании ω от 0 до ∞ будет равно

$$\Delta \arg \varphi(i\omega) = (n - 2m) \frac{\pi}{2}, \quad (5-14)$$

$$0 \leq \omega \leq \infty$$

где m - число корней характеристического уравнения разомкнутой системы $D(p) = 0$, лежащих в правой части плоскости корней.

Если замкнутая система устойчива, то изменение аргумента $D_3(i\omega)$ будет

$$\Delta \arg D_3(i\omega) = n \frac{\pi}{2} \quad (5-15)$$

$$0 \leq \omega \leq \infty$$

$$\text{Тогда } \Delta \arg \varphi(i\omega) = \Delta \arg D_3(i\omega) - \Delta \arg D(i\omega) = n \frac{\pi}{2} - (n - 2m) \frac{\pi}{2} = -m\pi \quad (5-16)$$

$$0 \leq \omega \leq \infty \quad 0 \leq \omega \leq \infty \quad 0 \leq \omega \leq \infty$$

Для этого случая частотный критерий устойчивости формулируется следующим образом.

Исследуемая система, неустойчивая в разомкнутом состоянии, будет устойчива в разомкнутом состоянии, если АФХ разомкнутой системы охватывает точку с координатами $-1, i0$ в положительном направлении (против часовой стрелки) $\frac{m}{2}$ раз.

Для астатических систем регулирования, содержащих, в частности, интегрирующие звенья, АФХ при $\omega = 0$ обращается в бесконечность. Для подобных разомкнутых систем характеристическое уравнение имеет корни, лежащие в начале координат плоскости корней, т.е. корни равные нулю. (Рис. 5.5)

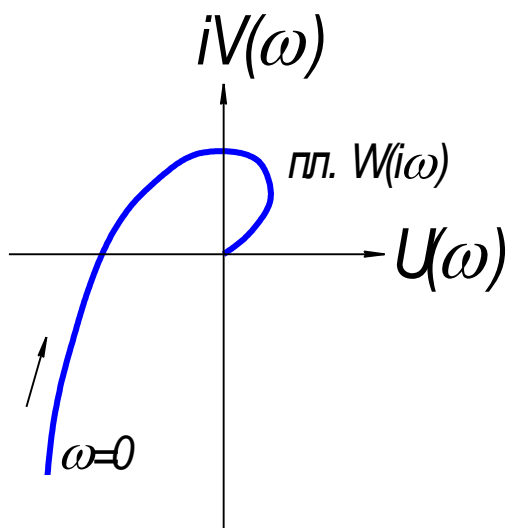


Рис. 5.5 Амплитудо-фазовая характеристика астатических систем регулирования..

В общем случае критерий устойчивости Найквиста-Михайлова формируется так.

Замкнутая система будет устойчива, если разность между положительными и отрицательными переходами АФХ разомкнутой системы отрезка действительной оси

$(-\infty, -1)$ равна $\frac{m}{2}$ раз, где m - число корней с положительной вещественной частью характеристического уравнения разомкнутой системы.

5.5 Выделение областей устойчивости системы.

Критерии устойчивости позволяют определить устойчива ли система регулирования, если все ее параметры - конструктивные, настроечные заданы. Однако динамические характеристики объекта регулирования и настройки регулятора в процессе эксплуатации могут изменяться в определенных пределах. В связи с этим возникает задача определения совокупности значений параметров, при которых система регулирования заданной структуры остается устойчивой.

Предположим, что в характеристическом уравнении системы регулирования

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n = 0 \quad (5-17)$$

все коэффициенты, за исключением двух, например a_1 и a_2 заданы. Построим плоскость с прямоугольными координатами a_1 и a_2 . В квадранте $a_1 > 0$ и $a_2 > 0$ произвольно выбираем точку, для которой соответствуют коэффициенты $a_1 = a_1'$ и $a_2 = a_2'$. Подставив их значения в характеристическое уравнение системы, определим корни этого уравнения. Если все найденные корни уравнения расположены слева от мнимой оси на комплексной плоскости корней, то это будет означать что система устойчива. Точку, выбранную на плоскости $a_1 - a_2$ с координатами a_1' и a_2' обозначим (-).

Выберем произвольно вторую точку с координатами $a_1 = a_1''$ и $a_2 = a_2''$ и, подставив в характеристическое уравнение значения этих коэффициентов, определим его корни. Если хотя бы один корень будет расположен справа от мнимой оси плоскости корней, то обозначим эту точку знаком (+), т.е. система регулирования при этом будет неустойчива.

Если при $a_1 = a_1'''$ и $a_2 = a_2'''$ хотя бы одна пара корней лежит на мнимой оси комплексной плоскости корней, обозначим точку на плоскости коэффициентов $a_1 - a_2$ нулем, что означает границу устойчивости системы регулирования.

Повторяя последовательно этот процесс, дадим коэффициентам a_1 и a_2 все возможные значения, отметим точки на плоскости $a_1 - a_2$ знаками (-), (+), 0 и проведем кривую через точки отмеченные нулем.

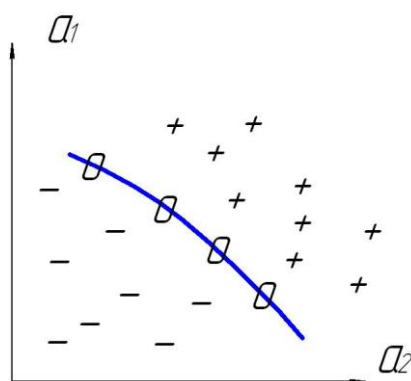


Рис. 5.6 Плоскость коэффициентов.

Эта кривая будет границей устойчивости в плоскости двух коэффициентов a_1 и a_2 характеристического уравнения системы регулирования. (Рис. 5.6)

Часть плоскости, включающая совокупность точек со знаком (-) называется областью устойчивости, а часть плоскости со знаком (+) – областью неустойчивости.

Область устойчивости в плоскости двух параметров системы была впервые выделена И.А. Вышнеградским в 1877 г., профессором С-Петербургского технологического института.

Аналогично весь процесс может быть проделан для любых других коэффициентов характеристического уравнения системы, например, для трех, и в этом случае получают объем устойчивости в пространстве коэффициентов характеристического уравнения.

Работы, в которых завершена разработка приемов выделения областей устойчивости и изложена общая точка зрения на разные критерии устойчивости были выполнены в России Ю.И. Неймарком.

Выделение области или объема устойчивости называют Д-разбиением плоскости или пространства параметров системы или определением границы ее устойчивости. Границу устойчивости называют границей Д-разбиения, имея ввиду обозначения характеристического уравнения $D(p) = 0$. Переход через границу Д-разбиения соответствует в плоскости корней переходу корней через мнимую ось. (Рис. 5.7)

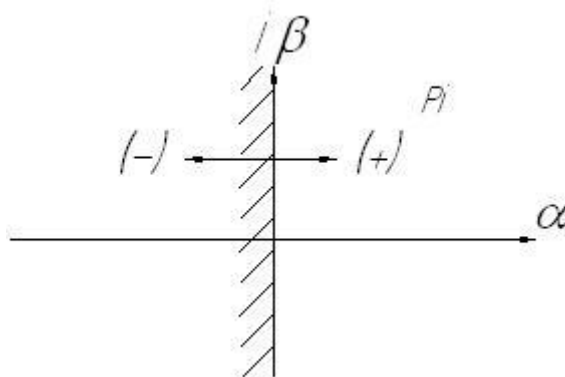


Рис. 5.7 Плоскость корней характеристического уравнения.

Отсюда следует метод определения границы Д-разбиения. Она определяется параметрически заменой в исследуемом полиноме – характеристическом уравнении p на $i\omega$, где ω - переменная величина, и может быть построена при изменении ω от $-\infty$ до ∞ . В этом смысле граница Д-разбиения есть отображение мнимой оси комплексной плоскости корней на плоскости коэффициентов характеристического уравнения.

Пример построения границы Д-разбиения и выделений области устойчивости для системы регулирования турбины, работающей в электрическую сеть.

$$T_a p \varphi = \mu \text{ -уравнение ротора;} \tag{5-17}$$

$$(T_1 p + 1)\mu = \mu_1 \text{ -уравнение главного усилителя;} \tag{5-18}$$

$$(\dot{O}_2 p + 1)\mu_1 = \zeta \text{ -уравнение промежуточного усилителя;} \tag{5-19}$$

$$\mu_2 = -\frac{1}{\delta} \varphi \text{ -уравнение регулятора скорости.} \tag{5-20}$$

Здесь φ - относительная частота вращения ротора турбины,

μ, μ_1 – относительные величины перемещения поршней сервомоторов усилителей системы регулирования турбины;

ζ - относительная величина перемещения муфты регулятора скорости;

T_a - динамическая постоянная ротора турбины;

T_1 и T_2 - времена сервомоторов;

δ - коэффициент неравномерности регулятора скорости.

$$T_a = 20c; T_1 = 0,5c; T_2 = 1c.$$

Параметром настройки регулятора скорости является коэффициент δ .

Необходимо определить возможный диапазон изменения коэффициента неравномерности δ , значения которого обеспечивали бы устойчивый процесс регулирования турбины.

Применим метод Д-разбиения для определения границы устойчивости работы АСР турбины по отношению к настроечному параметру δ . Обозначим $\frac{1}{\delta} = k$.

Характеристическое уравнение АСР турбины в общем виде:

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0, \quad (5-21)$$

где $a_0 = T_a \cdot T_1 \cdot T_2 = 1$; $a_1 = T_a(T_1 + T_2) = 12$; $a_2 = T_a = 20$; $a_3 = k$.

Решим характеристическое уравнение относительно k .

$$k = -p^3 - 12p^2 - 20p \quad (5-22)$$

Заменим $p = i\omega$, $i = \sqrt{-1}$

$$k = -(i\omega)^3 - 12(i\omega)^2 - 20(i\omega) \quad (5-23)$$

Выделим в этом уравнении вещественную и мнимую составляющие: $k = u + iv$

$u = 12\omega^2$ -вещественная составляющая

$v = \omega^3 - 20\omega$ -мнимая составляющая

Построим границу Д-разбиения в комплексной плоскости $(u - iv)$, задаваясь значениями ω в диапазоне от $-\infty$ до ∞ .

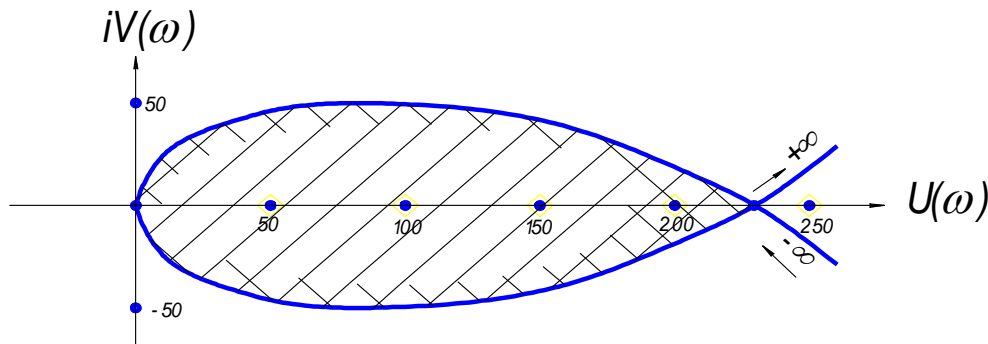


Рис. 5.8 Построение границы устойчивости.

В результате построения границы Д-разбиения получают на вещественной оси комплексной плоскости $(u - iv)$ две граничные точки параметра k : $k_1 = 0$, $k_2 = 240$ или при $\delta_1 \rightarrow \infty$, а $\delta_2 = 0,0042$ (Рис. 5.8).

Поскольку в плоскости корней характеристического уравнения область устойчивости находится слева от мнимой оси плоскости корней, то при движении вдоль границы Д-разбиения в сторону возрастания ω , область устойчивости располагается так же слева. Штриховкой определяем эту область. Следовательно устойчивая работа АСР турбины возможна при значениях коэффициента неравномерности δ при его значениях больше 0,0042.

Для построения области устойчивости по двум параметрам в характеристическое уравнение подставляют $p = i\omega$ и после разделения действительной и мнимой его части получают систему двух уравнений, определяющую кривую Д-разбиения. Если эти уравнения совместны, т.е если их совместное решение не приводит к противоречивому результату и

линейно независимы (не равносильны), то каждому значению ω соответствует одна пара неизвестных значений параметров и, следовательно, одна точка на плоскости.

При некоторых значениях ω уравнения могут стать равносильными. В этом случае для данного значения ω получается не точка, а кривая или прямая, которая называется особой. Обычно особые прямые появляются при значениях $\omega = 0$ и $\omega = \infty$, что соответствует переходу корня характеристического уравнения из левой части плоскости корней в правую ее часть через значение нуля или бесконечность. Особая прямая, соответствующая обращению корня в нуль, определяется из условия равенства нулю свободного члена характеристического уравнения. Особая прямая, соответствующая обращению корня в бесконечность, получается при приравнении нулю коэффициента при старшем члене характеристического уравнения.

Построив основную кривую Д-разбиения и дополнив ее особыми прямыми, находят область устойчивости, используя правила штриховки для ее определения, путем проверки соблюдения условий устойчивости для такой точки, находящейся внутри устойчивого регулирования, для которой вычисления производятся наиболее просто.

Правила штриховки границы Д-разбиения и определения области устойчивости.

Если главный определитель полученной системы уравнений больше нуля, то при изменении ω от $-\infty$ до ∞ штрихуется левая сторона кривой, если главный определитель меньше нуля, то следует штриховать правую сторону кривой Д-разбиения.

Особые прямые штрихуются так, чтобы вблизи точек пересечения их с основной кривой Д-разбиения штриховка была направлена согласно со штриховкой основной кривой. Если при переходе через точку пересечения знак главного определителя меняется, то направление штриховки особой прямой по обе стороны от точки пересечения различно. Если знак главного определителя не меняется, то особую прямую можно не штриховать, так как она является граничной.

Конструктивные и настроечные параметры системы должны обеспечивать достаточный запас устойчивости в ее работе. Чем дальше от поверхности или кривой, ограничивающих область устойчивости, находится рассматриваемая точка, тем большим запасом устойчивости обладает система.

5.6 Показатели устойчивости системы.

В плоскости корней характеристического уравнения АСР границей устойчивости является мнимая ось этой плоскости. Удаленность корней от мнимой оси определяет запас устойчивости. Так запас устойчивости может быть охарактеризован расстоянием α от мнимой оси ближайшей к ней пары комплексных сопряженных корней (Рис. 5.9).

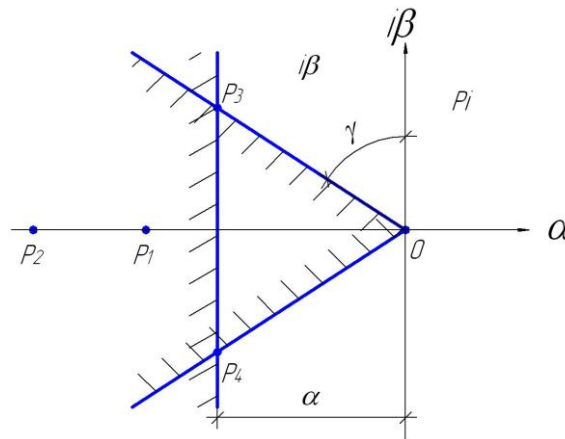


Рис. 5.9 Граница устойчивости на плоскости корней.

Здесь p_1 и p_2 - действительные отрицательные корни, p_3 и p_4 - комплексные сопряженные корни

Это расстояние называется степенью устойчивости. Запас устойчивости системы характеризуется так же углом γ , составленным мнимой осью с лучом, соединяющим ближайшим комплексный корень с началом координат плоскости корней. Тангенс этого угла называется степенью колебательности этой системы, а синус – коэффициентом затухания для переходных процессов системы регулирования.

Если свойства системы заданы частотными характеристиками, (Рис. 5.10) то запас устойчивости удобно характеризовать удаленностью АФХ разомкнутой системы регулирования от точки с координатами $-1, i0$ комплексной плоскости $u(\omega)$, $iV(\omega)$. Запас устойчивости характеризуется двумя численными величинами: запасом устойчивости системы по модулю и запасом ее устойчивости по фазе.

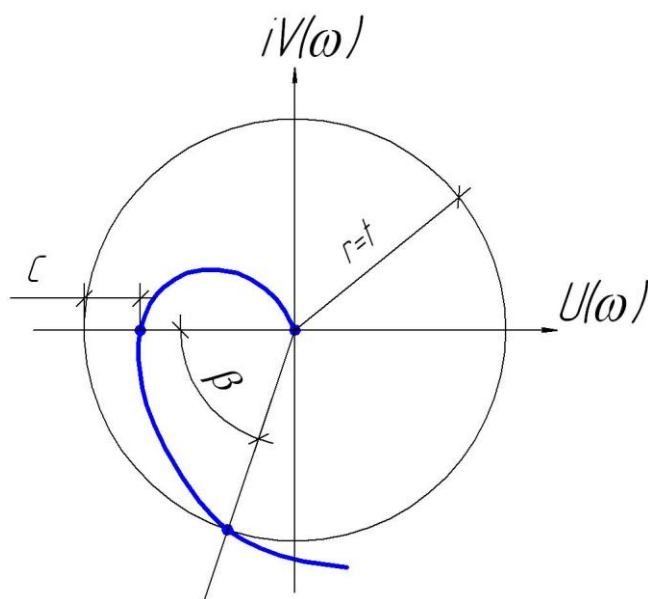


Рис. 5.10 Амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой системы.

Запас устойчивости по модулю определяется величиной отрезка c - расстояние от точки с координатами $-1, i0$ до точки пересечения АФХ с отрицательной действительной полуосью. Запас устойчивости по фазе характеризуется величиной угла β , который образован отрицательной действительной полуосью и лучом, соединяющим начало координат с точкой пересечения АФХ с окружностью радиусом $r=1$ с центром в начале координат плоскости. Эта величина показывает, насколько должно увеличиться отставание по фазе выходного сигнала в разомкнутой системе, что бы замкнутая АСР оказалась на границе устойчивости.

ГЛАВА 6. КАЧЕСТВО ПРОЦЕССОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА

Запас устойчивости является необходимым, но недостаточным условием оптимальности АСР. Процессы автоматического регулирования должны удовлетворять ряду требований, по степени выполнения которых судят о качестве АСР. Под качеством АСР понимают способность системы регулирования отвечать поставленным требованиям к ней

при заданных конкретных ограничениях. Для оценки качества необходимо иметь конечный продукт работа АСР- переходный процесс.

Существует два способа оценки качества АСР: прямые показатели качества, интегральные критерии качества.

6.1 Показатели качества регулирования.

Для оценки качества АСР используют следующие показатели переходного процесса (Рис. 6.11).

1) максимальное динамическое отклонение или ошибка регулируемого параметра $y_{1\text{вых}}$ от заданного.

2) максимальное отклонение или ошибка регулируемого параметра в установившемся режиме работы- статическая погрешность (ошибка) регулирования Δ .

3) время регулирования - T_p , определяемое от начала переходного процесса до момента, когда разность $y_1 - y_{\text{уст}}$ в установившемся режиме будет меньше заданной статической погрешности (ошибки) Δ .

4) степень затухания регулируемой величины

$\psi = \frac{y_1 - y_3}{y_1}$ -отношение двух амплитуд переходного процесса одного направления к первой из них по ходу процесса.

5) перерегулирование $\varepsilon = \frac{y_2}{y_1}$ -отношение второй амплитуды переходного процесса к первой.

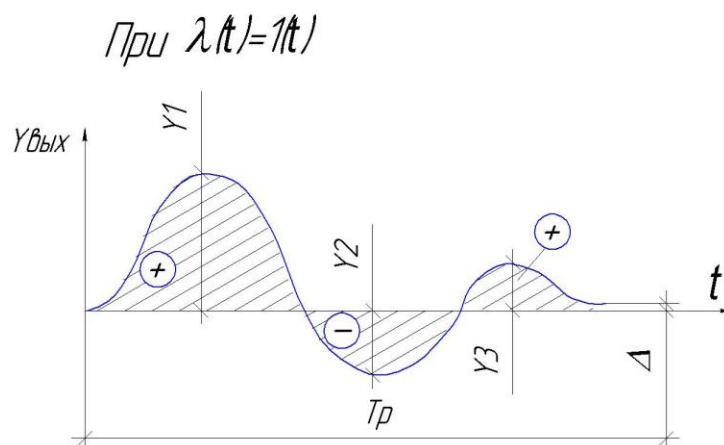
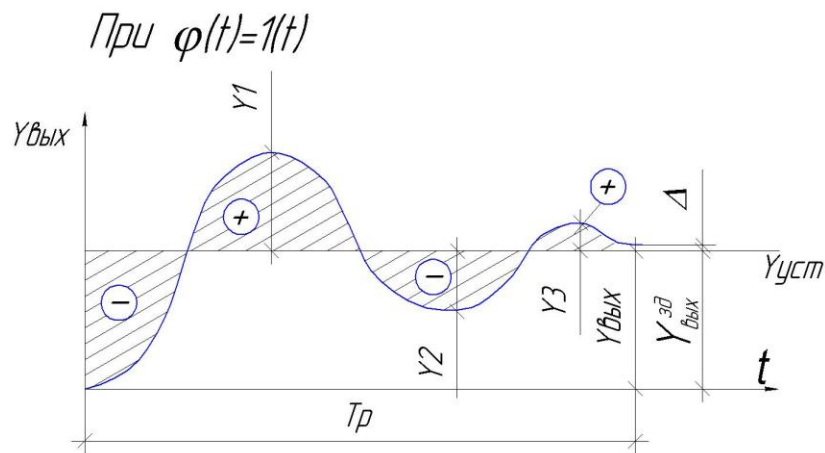


Рис. 6.11 Переходные процессы АСР.

Система регулирования отвечает требованиям качества, если она удовлетворяет одновременно 3-4 показателям качества в соответствии с их заданными значениями. Оптимально, если $y_1 - \min$; статическая ошибка регулирования в заданных пределах, затухание интенсивно, время регулирования минимальное.

6.2 Интегральные критерии качества регулирования.

Обобщающим для прямых показателей качества переходных процессов (Рис.6.11) служит линейный интегральный критерий J - численно равный алгебраической сумме площадей, заключенных между кривой переходного процесса и осями либо времени, либо заданного установившегося значения регулируемой величины, при этом каждая площадь берется со своим знаком (+) или (-).

$$J = \int_0^{\infty} y(t) dt, \text{ практически } J = \int_0^{T_p} y(t) dt,$$

где T_p - время регулирования.

Оптимальный по значению линейный интегральный критерий равен минимальной сумме площадей. Однако для колебательных переходных процессов с постоянной амплитудой колебания $y^{вых}(t)$ алгебраическая сумма площадей между кривой $y(t)$ и осью времени t будет равно 0, т.е. $J = 0$ для незатухающих процессов, неприемлемых с точки зрения качества регулирования. Поэтому для оценки качества колебательных переходных процессов, в том числе слабо затухающих, используют интеграл от модуля регулируемой величины

$$J_M = \int_0^{T_p} |y(t)| dt$$

В этом случае значение J_M не зависит от знака переменной (площадей)

Если имеются трудности в вычислении этого интеграла, то для оценки качества слабо затухающих переходных процессов используют квадратичный интегральный критерий

$$J = \int_0^{T_p} [y(t)]^2 dt$$

Интегральные критерии можно использовать для оценки качества переходного процесса, если известна передаточная функция замкнутой АСР

$$J = \int_0^{T_p} y(t) dt = \lim_{p \rightarrow \infty} \frac{W_{3e}(p)}{p}, \text{ если } p \rightarrow 0.$$

Качественное регулирование существенно влияет на экономичность и надежность работы оборудования ТЭС. Значительные по амплитуде и длительности отклонения $y_{вых}$ от $y_{цй}$ ухудшают показатели экономичности и надежности работы оборудования, например, увеличение температуры перегретого пара может привести к повреждению труб поверхностей нагрева.

Кратковременное, но значительное по величине отклонения $y_{вых}$ могут привести к повреждению основного оборудования, так, перепитка барабанного котлоагрегата может привести к забросу воды в паропровод и повреждению лопаток ротора турбоагрегата.

Незначительные, но длительные и систематические отклонения $y_{вых}$ от $y_{цй}$ могут привести к ухудшению экономических показателей паротурбинным установкам. Отклонение содержания O_2 в уходящих дымовых газах от оптимального значения приводит даже при незначительном снижении КПД котла к большому перерасходу топлива, а снижение

давления свежего пара P_0 , уменьшает величину срабатываемого теплоперепада в турбоагрегате, что приводит к падению мощности турбоагрегата.

Таким образом, экономичность, надежность, срок службы энергооборудования тесно связаны с качеством работы АСР, о котором судят по виду переходного процесса, показателям и критериям качества регулирования.

ГЛАВА 7. ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ В АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Законом регулирования называется математическая зависимость между положением регулировочного органа системы и сигналом, поступающим на вход регулятора. $x_{рег} = f(x_{ex})$

7.1 Функциональная схема регулятора.

Функциональная схема регулятора (Рис.7.1) состоит из следующих элементов

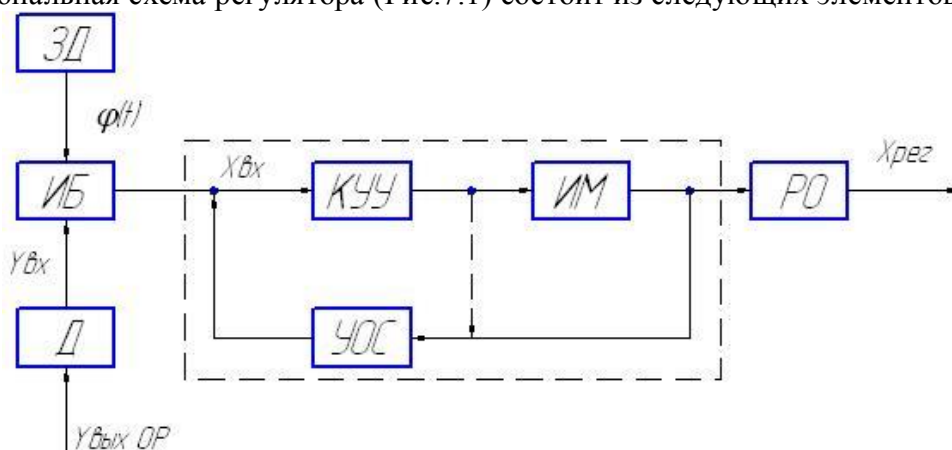


Рис. 7.1 Функциональная схема регулятора.

Д – датчик; *ЗД* – задатчик; *ИБ* – измерительный блок; *КУУ* – командно-усилительное устройство; *ИМ* – исполнительный механизм; *УОС* – устройство обратной связи; *РО* – регулировочный орган.

Датчик (*Д*) – первичный прибор, который служит для измерения регулируемой величины $\delta_{a\ddot{a}o}(t)$ и преобразования ее в сигнал y_{ex} , поступающий на измерительный блок (*ИБ*). В качестве измерительных устройств теплотехнических первичных приборов используется термопары, термометры сопротивления, манометрические пружины и мембраны, дифманометры и др.

Преобразование сигнала регулируемой величины $y_{вых}$ в y_{ex} осуществляется с помощью специальных преобразователей, для их унификации. При этом унифицированный сигнал рассчитан на многократное использование в нескольких приборах и регуляторах одновременно. Применение датчиков с унифицированным выходным сигналом предусматривается государственной системой приборов, например, $0-5мА$, $1-5мА$, $0-20мА$, $4-20мА$, $0-10В$ для электрических сигналов, $0,02-0,1МПа$ для пневматических и $0,05-0,25МПа$ для гидравлических сигналов.

Требования к датчикам промышленных регуляторов:

1) направленность действия – изменение выходного сигнала датчика не должно оказывать действие на значение входного сигнала;

- 2) высокая чувствительность и малая инерционность;
- 3) Линейность статической характеристики;
- 4) высокая надежность – отказ в работе может привести к отказу и ложным срабатываниям АСР.

Датчики устанавливаются непосредственно на объектах регулирования, часто находясь в контакте с измеряемой средой, поэтому они должны обладать высокой устойчивостью к термическим и механическим воздействиям, вибрации и коррозии.

Задатчик ручного управления (ЗД) – предназначен для формирования сигнала, соответствующего заданному значению регулируемой величины. Его выходной сигнал так же формируется унифицированным, как и выходной сигнал датчика. Например, если датчик имеет на выходе напряжение постоянного тока, то и с выхода задатчика должно поступать напряжение постоянного тока.

Конструктивно задатчик может быть встроен в ИБ регулятора или установлен отдельно на щите управления.

Требования к задатчикам: высокая стабильность выходного сигнала, достаточный диапазон изменения сигнала, позволяющий компенсировать постоянную составляющую регулируемой величины.

Композиционно структура регулятора определяется наличием следующих элементов:

- измерительный блок (ИБ), на который поступают сигналы от датчика регулируемого параметра и задатчика. В ИБ происходит сравнение этих двух сигналов, их алгебраическое суммирование;

- командно-усилительное устройство (КУУ), предназначенное для усиления выходного сигнала ИБ до значений, необходимых для управления исполнительным механизмом;

- устройство обратной связи (УОС) - внутренняя отрицательная обратная связь для стабилизации процесса регулирования. Сигнал на УОС поступает либо от КУУ, либо от исполнительного механизма;

- исполнительные устройства регуляторов (ИМ), предназначенные для перемещения регулировочных органов, с которыми они сочленены посредством механической передачи.

Формирование законов регулирования осуществляется на основе статических и динамических свойств трех элементов регулятора: КУУ, УОС и ИМ, при этом стремятся реализовать законы регулирования так, чтобы их описание стало возможно линейными дифференциальными уравнениями.

7.2 Законы регулирования.

К числу реализуемых законов регулирования в теплоэнергетике относят:

- пропорциональный закон регулирования, П – закон;
- интегральный закон, И – закон;
- пропорционально - интегральный закон, ПИ – закон;
- пропорционально – дифференциальный закон, ПД – закон;
- пропорционально – интегрально - дифференциальный закон, ПИД - закон;

Действие регулятора всегда направлено в сторону противоположную отклонению регулируемого параметра, поэтому в уравнениях, описывающих законы регулирования, регулирующее воздействие в сторону объекта регулирования всегда со знаком действия, противоположным отклонению регулируемой величины.

Пропорциональный закон регулирования, П - закон.

$$\text{Уравнение закона регулирования } x_{рег} = k_p x_{вх} \quad (7-1)$$

В этом случае каждому значению входного параметра x_{ex} соответствует определенное положение регулировочного органа $x_{рег}$. Регулятор, реализующий П-закон регулирования, называется П-регулятором.

Передаточная функция регулятора $W(p) = k_p$. (7-2)

Статическая характеристика пропорционального регулирования (Рис. 7.2)

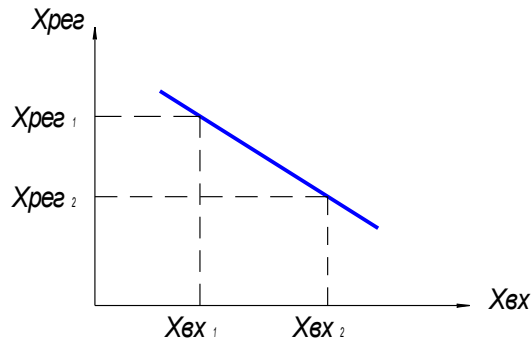


Рис. 7.2 Статическая характеристика.

$k_p = \frac{x_{рег}}{x_{ex}}$ - коэффициент передачи (усиления) регулятора

Для замкнутой АСР, состоящей из ОР и П - регулятора, характерно наличие остаточного отклонения регулируемой величины или ошибки, по окончанию процесса регулирования.

$\frac{1}{k_p} = \delta$ - коэффициент неравномерности или статизм регулирования для П - регулятора, определяет величину погрешности регулирования в установившихся процессах.

Динамическая характеристика П - регулятора. (Рис. 7.3)

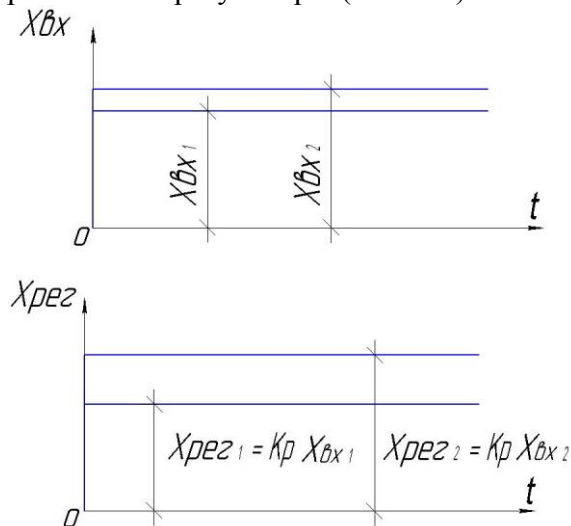


Рис. 7.3 Динамическая характеристика П-регулятора.

Динамическая характеристика АСР с П-регулятором (Рис. 7.4).

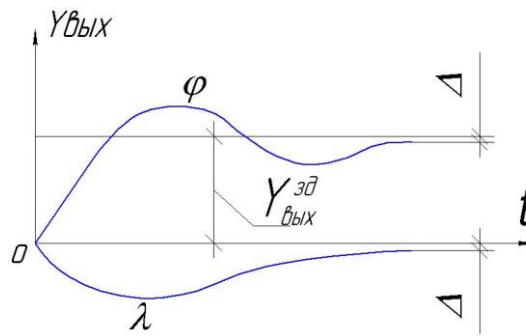


Рис. 7.4 Переходные процессы в АСР с П-регулятором при управляющем (1) и возмущающем (2) воздействии.

Настройным параметром П – регулятора является δ - его коэффициент неравномерности. При настройке устанавливают допустимые отклонение регулируемого параметра от заданного значения в статике – погрешность регулирования.

Достоинство П - регуляторов – динамичность; регулятор вступает в действие сразу после получения сигнала на его вход. Недостатком регулятора является наличие ошибки регулирования в статике. От ошибки не избавится, так как статическая характеристика П-регулятора имеет наклон, величина которого зависит от коэффициента неравномерности σ .

Интегральный закон регулирования, И – закон.

$$\text{Уравнение закона регулирования } \frac{dx_{pez}}{dt} = k_u x_{ex} \quad (7-3)$$

Проинтегрировав уравнение (7.3) получим

$$x_{pez} = k_u \int_0^{\infty} x_{ex}(t) dt,$$

где k_u - коэффициент передачи, характеризующий скорость нарастания сигнала на выходе после нанесения воздействия x_{ex} .

Передаточная функция интегрального (И) регулятора

$$W(p) = \frac{k_u}{p} \quad (7-4)$$

Другая формула записи И- закона регулирования

$$x_{pez} = \frac{k_p}{T_u} \int_0^{T_u} y_{ex}(t) dt \quad (7-5)$$

Передаточная функция интегрального (И) регулятора

$$W(p) = \frac{k_p}{\delta p}, \quad (7-6)$$

k_p - условный коэффициент передачи И- регулятора,

T_u - условная постоянная времени интегрирования.

Скоростная характеристика И – регулятора

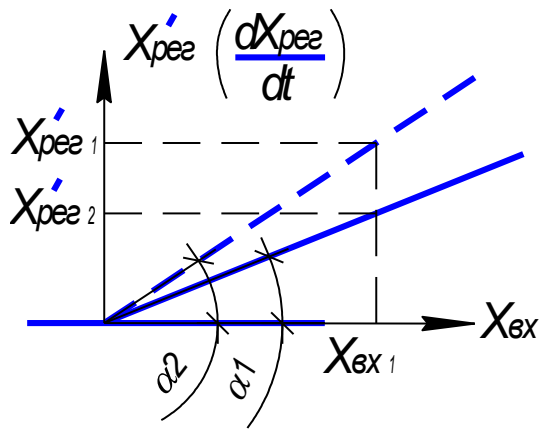


Рис. 7.5 Скоростная характеристика И-регулятора

Чем больше k_u , тем больше угол наклона α при одинаковой величине воздействия.
 Статическая характеристика регулятора (рис.7.6)

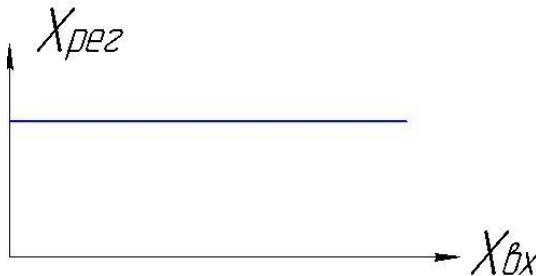


Рис. 7.6 Статическая характеристика И-регулятора

Достоинство И- регулятора - отсутствие статической погрешности регулирования.
 Динамическая характеристика И-регулятора (Рис.7.7).

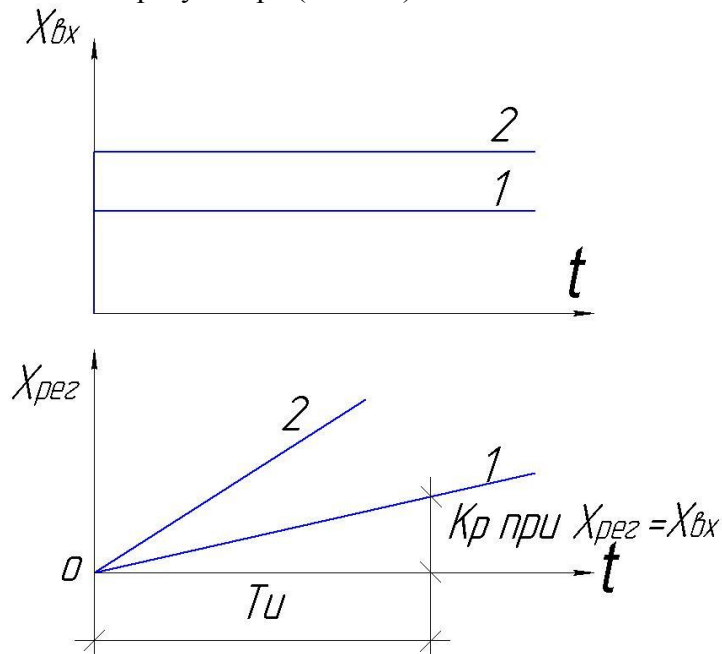


Рис. 7.7 Динамическая характеристика И-регулятора

Чем больше по величине сигнал на входе регулятора, тем выше скорость перемещения регулировочного органа при одном и том же воздействии. Чем больше k_p , тем больше скорость перемещения регулировочного органа.

Пропорционально - интегральный закон регулирования. ПИ – закон.

Преимущества П - регулятора (его динамичность) и И - регулятора (отсутствие в статике погрешности регулирования) объединены в ПИ – законе и соответственно в ПИ-регуляторе, когда регулировочные органы перемещаются со скоростью, пропорциональной величине и скорости изменения входного сигнала поступающего на ПИ – регулятор.

Уравнение

$$\frac{dx_{pez}(t)}{dt} = k_p \frac{dx_{ex}(t)}{dt} + \frac{k_p}{T_u} x_{ex}(t) \tag{7-7}$$

Проинтегрировав уравнение (7.7), получим (7.8)

$$x_{pez} = k_p x_{ex}(t) + \frac{k_p}{T_u} \int_0^{T_u} x_{ex}(t) dt \tag{7-8}$$

Передаточная функция для ПИ-регулятора.

$$W(p) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_u p}\right) \tag{7-9}$$

Динамическая характеристика ПИ-регулятора.

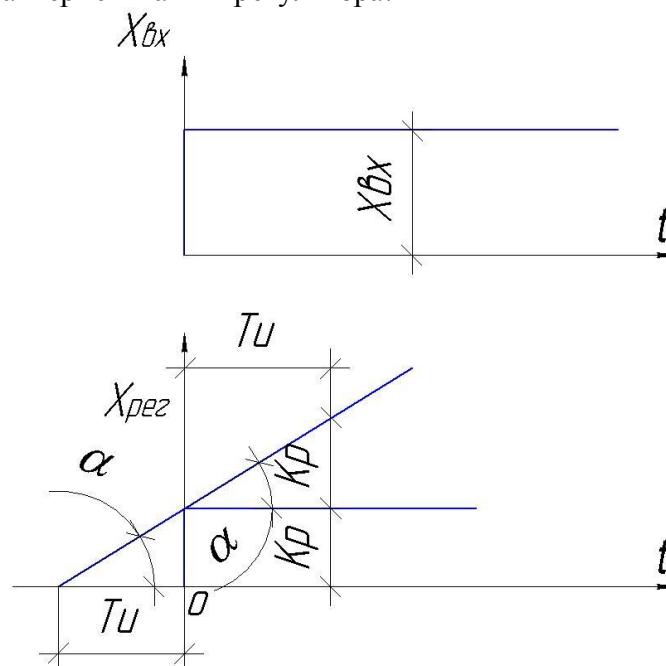


Рис. 7.5 Динамическая характеристика ПИ-регулятора

В замкнутой одноконтурной АСР, состоящей из ОР и ПИ-регулятора отсутствует остаточная погрешность регулируемого параметра. В то же время при установившемся значении регулируемого параметра регулирующий орган может занимать различные положения.

Параметры настройки ПИ – регулятора: k_p и $T_u \cdot k_{\delta} = \frac{1}{\delta}$.

Пропорционально-дифференциальный закон регулирования, ПД – закон.

П, И, ПИ-регуляторы реагируют только на возникшие нарушения технологического процесса. Если же регулируемая величина $y_{вых}$ в какой то момент времени начинает быстро отклоняться от заданного значения, то это значит, что на ОР поступило значительное воздействие и что отклонение $y_{вых}$ в результате этого может быть так же значительным.

В этом случае целесообразно, чтобы регулятор вырабатывал регулирующее воздействие пропорционально скорости отклонения $y_{вых}$ от $\delta_{зад}$.

С этой целью в состав АСР вводят дифференциатор- устройство, позволяющее формировать в законе регулирования сигнал, пропорциональный скорости изменения регулируемой величины (Рис. 7.9).

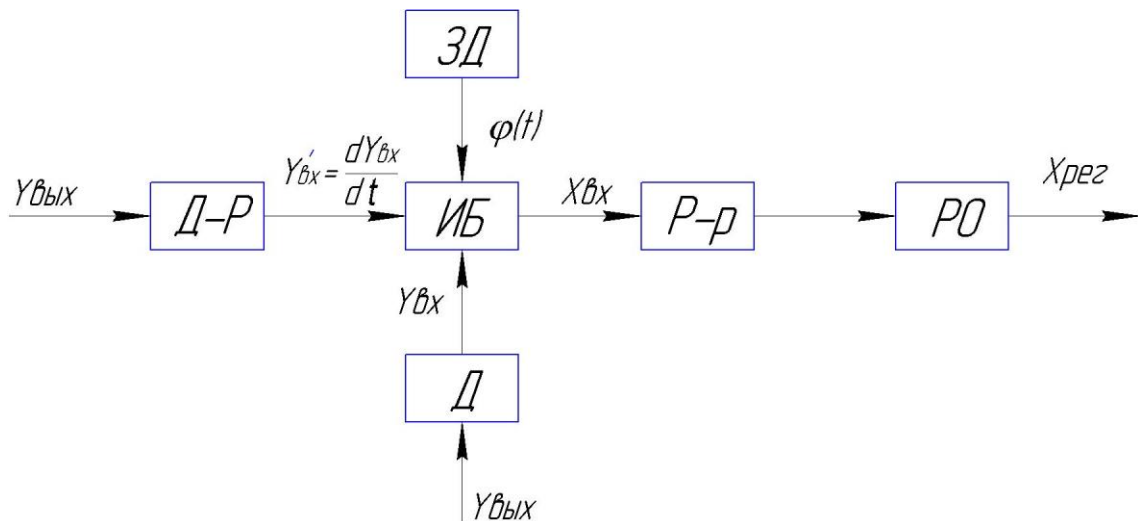


Рис. 7.9 структурная схема ПД-регулятора
Д-р – дифференциатор, П-р – П-регулятор

Закон регулирования:

а) для идеального дифференциатора

$$x_{рег} = k_p x_{ex} + k_p T_d \frac{dx_{ex}}{dt} \quad (7-10)$$

Передаточная функция ПД - регулятора

$$W(p) = k_p (1 + k_p T_d p) \quad (7-11)$$

б) для реального дифференциатора

$$x_{рег} = k_p \left(1 + \frac{k_d T_d p}{1 + T_d p}\right) x_{ex} \quad (7-12)$$

Передаточная функция реального дифференциатора

$$W(p) = k_p \left(1 + \frac{k_d T_d p}{1 + T_d p}\right) k_p = k_p \left(1 + \frac{k_d T_d}{1 + T_d p}\right) \quad (7-13)$$

Здесь k_p - коэффициент передачи собственно регулятора, $k_p = \frac{1}{\delta}$

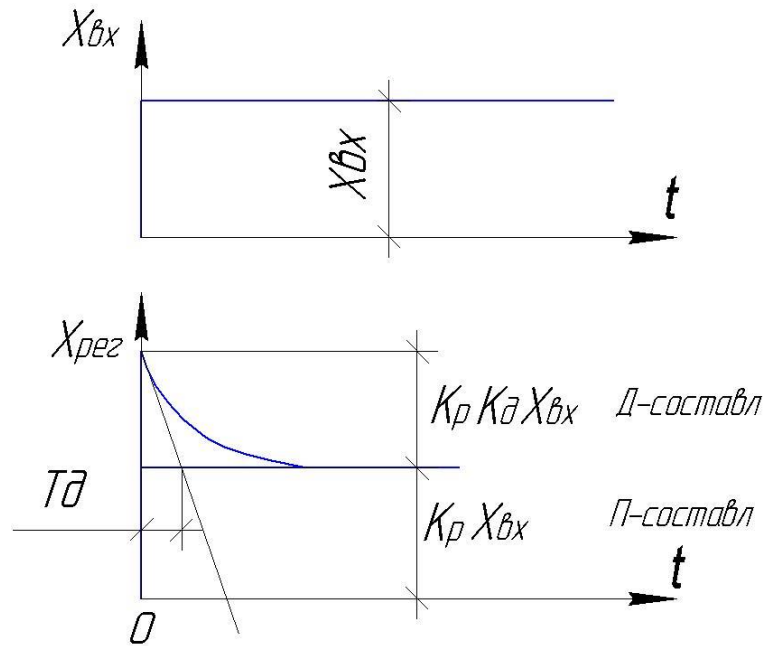
k_d - коэффициент усиления дифференциатора,

T_d - постоянная времени дифференциатора – время действия дифференциатора.

При отклонении регулируемого параметра на выходе регулятора мгновенно появляется сигнал от действия дифференцирующего устройства и затем сигнал от пропорциональной его составляющей.

В установившемся движении АСР сигнал от дифференциатора спадает до нуля и остается сигнал П - составляющей, равный $x_{рез} = k_p x_{ex}$.

Динамическая характеристика ПД-регулятора (Рис.7.10)



7.10 Динамическая характеристика ПД- регулятора

Параметры настройки ПД –регулятора $T_d, k_d, k_p = \frac{1}{\delta}$

Время T_d определяют как время полуспада сигнала напряжения на выходе дифференциатора от U_1 до U_2 (Рис. 7.11)

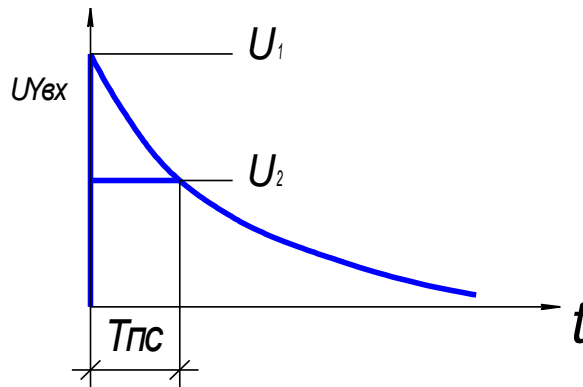


Рис. 7.11 Изменение выходного сигнала дифференциатора.

$U_2 = 0,5U_1, T_{пс}$ - время полуспада сигнала.

Применение дифференциатора сокращает время переходного процесса $T_{пс}$ и уменьшает первую амплитуду изменения регулируемой величины, что улучшает динамику регулирования.

Пропорционально-интегрально-дифференциальный, ПИД закон регулирования.

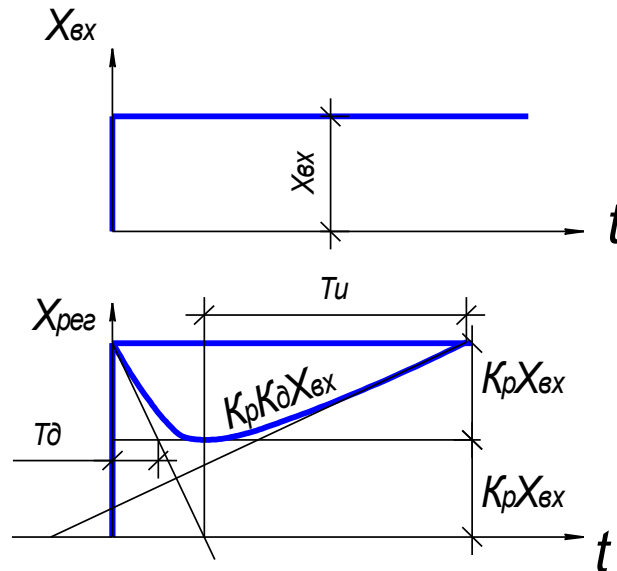
Закон регулирования

$$x_{рез} = k_p x_{ex} + \frac{k_p}{T_u} \int x_{ex} dt + k_d k_p T_d \dot{x}_{ex}. \quad (7-14)$$

Передаточная функция ПИД - регулятора

$$W(p) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_u p} + \frac{k_d T_d p}{1 + T_d p} \right). \quad (7-15)$$

Динамическая характеристика (Рис.7.12)



7.10 Динамическая характеристика ПИД- регулятора

Достоинства ПИД – регулятора: реагирует на отклонение $y_{вых}$ и скорость отклонения $\dot{y}_{вых}$, статическая погрешность $\Delta = 0$, улучшает переходный процесс, сокращая время переходного процесса, уменьшает амплитудные колебания $y_{вых}$.

Недостаток: сложность настройки регулятора $k_p \cdot T_u \cdot k_d \cdot T_d$

В теплоэнергетике применяют П, ПИ, ПИД законы.

ГЛАВА 8. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ В АСР

Назначения исполнительного механизма (ИМ) или сервопривода - перемещение регулировочных органов объектов регулирования. По виду используемой энергии делятся на электрические, гидравлические, пневматические. Основные показатели ИМ: усилие, развиваемой на выходе, максимальный ход поршня (угол поворота вала).

Управление ИМ осуществляется через командно-усилительное устройство регулятора либо в ручную или дистанционно.

В зависимости от режимов работы исполнительные механизмы подразделяются на ИМ с постоянной скоростью, ИМ с переменной скоростью, ИМ с пропорциональной скоростью перемещения выхода устройства (вала, поршня)

8.1 Исполнительные механизмы с постоянной скоростью.

К ним относят ИМ, у которых скорость не зависит от величины управляющего сигнала.

$$\text{Уравнение движения } T_e \frac{dx_{рез}}{dt} = \pm 1(t) \quad (8-1)$$

$$\text{Передаточная функция } W^{ИМ}(p) = \frac{1}{T_s p}, \quad (8-2)$$

где T_s – время действия ИМ.

Скоростная характеристика ИМ (Рис. 8.1)

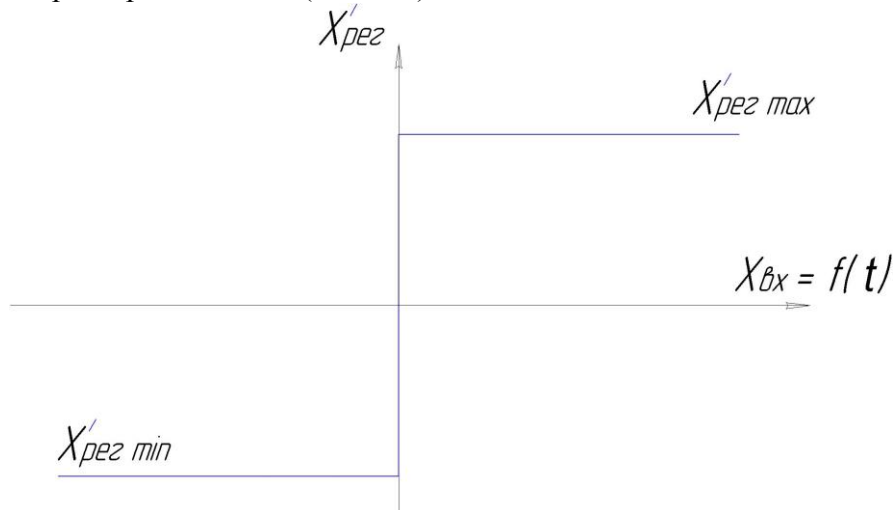


Рис. 8.1 Скоростная характеристика.

$x'_{рез}$ - скорость перемещения выходного устройств ИМ.

Динамическая характеристика (Рис. 8.2)

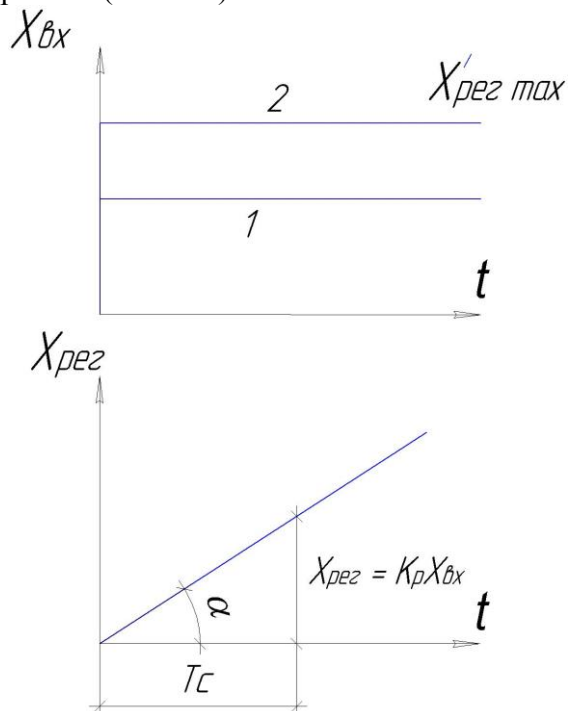


Рис. 8.2 Динамическая характеристика ИМ.

1,2 - величины выходного воздействия

Здесь скорость перемещения выходного устройства ИМ не зависит от величины воздействия. $V = \frac{1}{T_c}$ - скорость перемещения выходного устройства ИМ.

Для реальных ИМ с постоянной скоростью скоростная характеристика имеет зону нечувствительности пускового устройства Δ_n (Рис. 8.3).

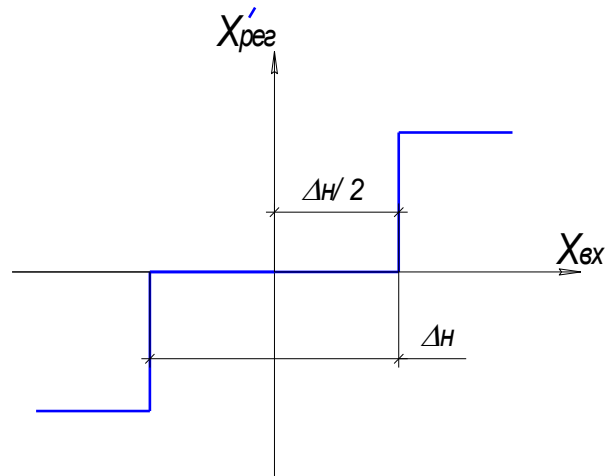


Рис. 8.3 Скоростная характеристика реального ИМ.

В качестве пускового устройства используется, как правило, электромагнитные устройства, как-то магнитные пускатели или электромагнитные реле.

Электрический ИМ может находиться в 3-х состояниях:

- 1) вращение ротора с постоянной скоростью в направлении (+);
- 2) неподвижность;
- 3) вращение ротора в направлении (-) – в противоположном (+) направлении.

Применение пусковых устройств усложняет характеристику ИМ, т.к. гистерезисные явления в магнитных цепях приводят к появлению зон возврата $\Delta_в$, при этом ИМ отключаются при несколько меньших значениях входного сигнала $x_{вх} = \frac{\Delta_n}{2} - \Delta_в$, чем при включении.

Функциональная схема промышленных регуляторов с нелинейным элементом в прямом канале усиления представлена на Рис. 8.4.

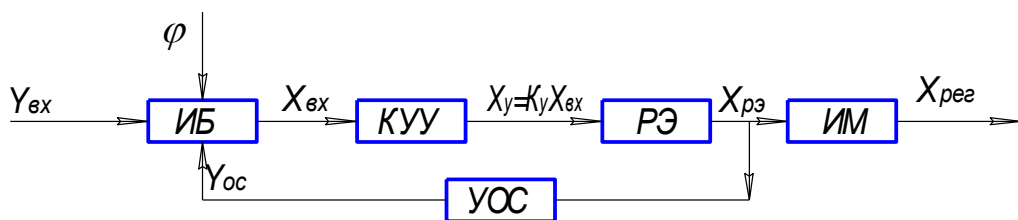


Рис. 8.4 Функциональная схема регулятора с релейными элементами.

УОС-RC-цепочка, инерционное звено $t^{0.20}$ порядка, РЭ- реальный элемент (3-х позиционное реле).

Статическая характеристика 3-х позиционного реле (Рис. 8.5). Здесь x_y - выходной сигнал КУУ, входящий на релейный элемент, $x_{рэ}$ - выходной сигнал РЭ- на ИМ и УОС.

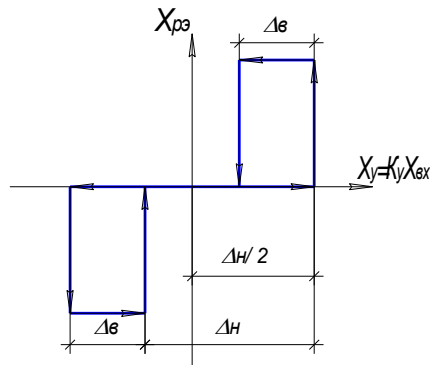


Рис. 8.5 Статическая характеристика трехпозиционного реле.

Δ_H - зона не чувствительности ($\frac{\Delta_H}{2}$ - полузона), $\Delta_в$ - зона возврата.

Таким образом, характеристики ИМ с постоянной скоростью перемещения выходного устройства, включающего пусковое устройство, является существенно нелинейной и всякая линейная аппроксимация статической характеристики приводит к качественным отличиям в работе реальной АСР от идеальной.

Регуляторы такого состава относятся к релейно-импульсным автоматическим регуляторам, и режим его работы называется релейно-импульсным. Однако статическая характеристика регулятора может быть близка к линейной.

При подачи на вход ИБ релейно-импульсного регулятора ступенчатого сигнала $y_{вх}$ (например, перемещением ручки задатчика) сигнала на выходе КУУ будет иметь значение $x_y = k_y x_{вх}$. При превышении этим сигналом зоны нечувствительности прямого хода трехпозиционного реле $x_y > \frac{\Delta}{2}$, в момент времени $t = 0$ произойдет включение реле и ступенчатый сигнал $x_{pз}$ через пусковое устройство включит ИМ, который начнет перемещаться с постоянной скоростью $V = \frac{1}{T_c}$. Одновременно сигнал $x_{pз}$ поступит на вход УОС.

ИМ с постоянной скоростью находят широкое применение в АСР, в т.ч. для энергооборудования котлотурбинных и реакторных цехов на базе электрической ветви средств автоматизации.

Их достоинства: простота в эксплуатации, удобства монтажа и наладки, отсутствие ограничений пространственного расположения, высокая скорость передачи информации. Однако надежность работы электродвигателей заметно снижается при их использовании в условиях горячих цехов с высокой влажностью, на участках с повышенной вибрацией.

На базе электрических двигателей трудно построить компактный ИМ большой мощности. Электродвигатели общепромышленного назначения, как и любые электрические устройства, нельзя применять на взрыво и пожароопасных участках промышленных производств.

8.2 Исполнительные механизмы с переменной скоростью.

$$\text{Уравнения движения } T_c \frac{dx_{pз}}{dt} = kx_{вх}, \quad (8-3)$$

где T_c - время полного хода выходного устройства-сервопривода.

Передаточная функция

$$W(p) = \frac{k}{T_c p} \quad (8-4)$$

k - размерный коэффициент передачи.

К числу исполнительных механизмов с переменной скоростью относятся гидравлические ИМ

Скоростная характеристика (Рис. 8.6)

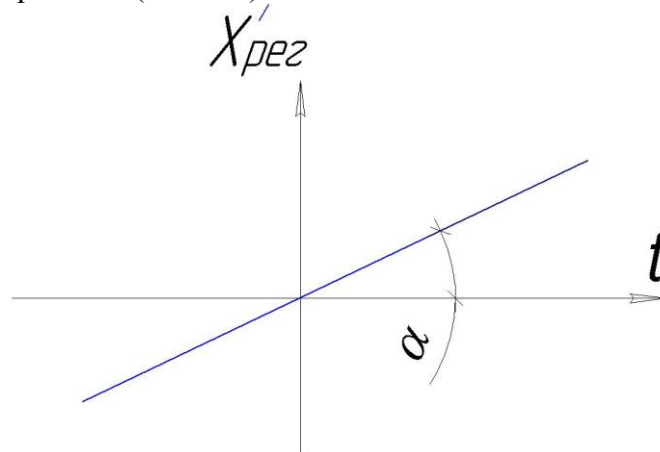


Рис. 8.6 Скоростная характеристика ИМ с переменной скоростью.

Динамическая характеристика (Рис. 8.7)

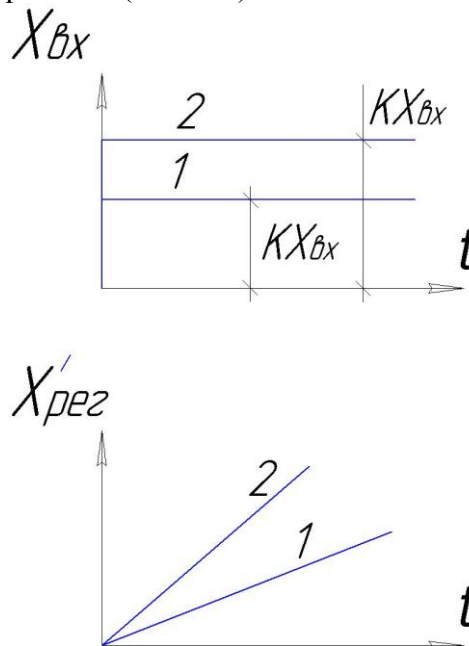


Рис. 8.7 Динамическая характеристика.

Скорость перемещения выходного устройства зависит от величины сигнала на вход ИМ.

Достоинства ИМ с переменной скоростью в том, что они позволяют надежно и просто реализовать преобразование управляющих сигналов в перемещение регулировочных органов, осуществляемой с большой скоростью и мощностью. Они надежно работают в неблагоприятных условиях при высокой влажности, повышенной температуре, вибрации и пр.

Недостатками этих ИМ является то, что гидравлические системы требуют тщательной герметизации линий связи, кроме того, необходимо иметь специальные емкости для хранения рабочей жидкости.

Гидравлические АСР повсеместно применяются в АСР паровых и газовых турбин.

8.3 Исполнительные механизмы с пропорциональной скоростью.

$$\text{Уравнение движения } \frac{dx_{рез}}{dt} = k \frac{dx_{вх}}{dt} \quad (8-5)$$

Проинтегрировав (8.5) получим $x_{рез} = kx_{вх}$,

Передаточная функция

$$W(p) = k \quad (8-6)$$

Скорость движения выходного устройства пропорциональна скорости входного сигнала ИМ.

Статическая характеристика ИМ с пропорциональной скоростью (Рис. 8.8)

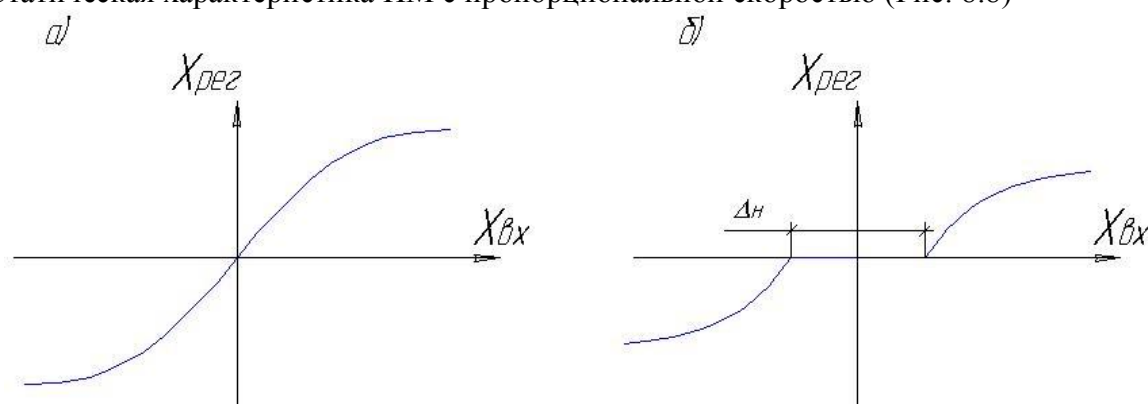


Рис. 8.8 Статические характеристики ИМ с пропорциональной скоростью. а) идеального, б) реального, где Δ_n - зона нечувствительности.

Динамическая характеристика (Рис. 8.9)

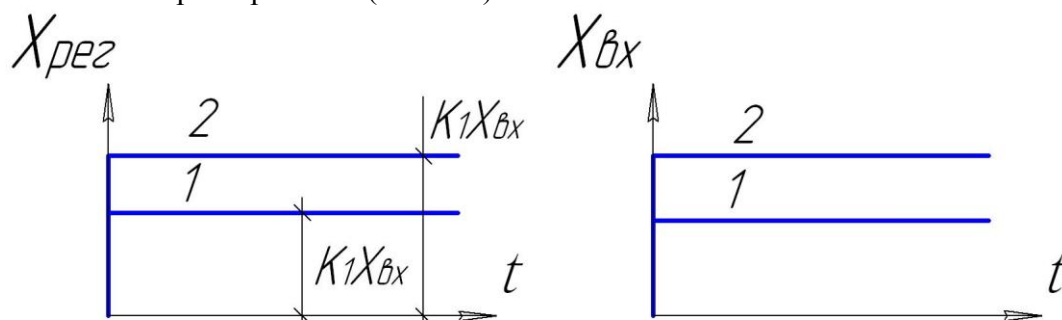


Рис. 8.9 Динамическая характеристика ИМ с пропорциональной скоростью.

К числу ИМ с пропорциональной скоростью перемещения выходного устройства относятся: пневматические сервоприводы, мембранные ИМ с уравновешивающей пружиной. Верхняя ветвь пневматических АСР строится на электрических элементах. Достоинствами ИМ с пропорциональной скоростью является надежность в работе, высокая пожаро и взрывобезопасность. Недостатками: необходимость применения специальных компрессорных установок питания с устройствами для очистки воздуха, относительно малая скорость передачи и преобразования информации. Этот тип исполнительных механизмов применяется в цехах с повышенной влажностью, в химических цехах ТЭС.

Общим недостатком сервоприводов всех перечисленных выше исполнительных механизмов является разгон и выбег выходного вала или поршня, связанные с

инерционностью вращающихся или движущихся масс. Разгон выходного устройства характеризуется временем разгона Δt_p , выбег- временем выбега- Δt_e или полувыбега $\frac{\Delta t_e}{2}$, обычно Δt_e невелико (Рис. 8.10).

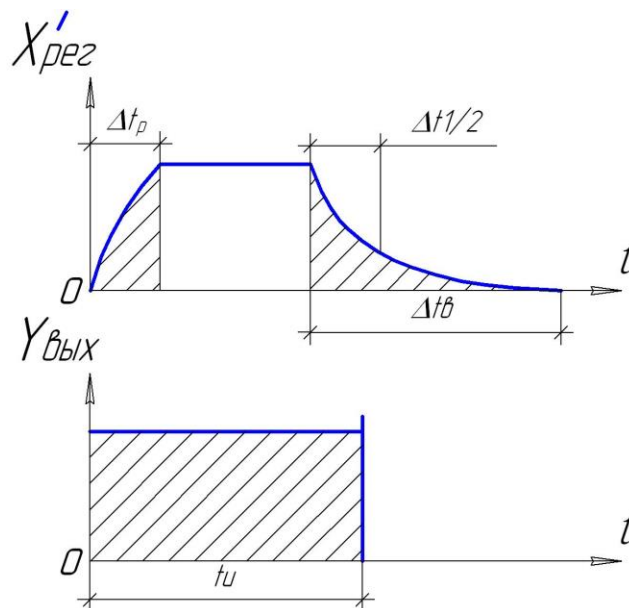


Рис. 8.10 Характеристика «выбега» сервопривода.

На долю выбега приходится наиболее существенное дополнительное перемещение регулирующего органа $x_{рег}$ после снятия управляющего сигнала. Выбег сервопривода может существенно исказить динамические характеристики регулятора. Для устранения выбега предусматриваются специальные тормозные устройства (механические, электрические, электромагнитные).

Требования к сервоприводам промышленных регуляторов. Сервоприводы промышленных регуляторов должны иметь:

- некоторый запас мощности по отношению к максимальному перестановочному усилию $\sim 25\%$, чрезмерный запас мощности экономически не выгоден,
- минимальный выбег Δt_e , Отсутствие «мертвого хода» или зона нечувствительности должна быть минимальна,
- реверсирование хода, т.е. возможность изменения направления движения сервопривода в зависимости от знака управляющего сигнала.

ГЛАВА 9. РЕАЛИЗАЦИЯ ЗАКОНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Основными элементами регулятора, формирующими законы регулирования, является командно-усилительное устройство (КУУ), устройство обратной связи (УОС) и исполнительный механизм (ИМ). При этом обратная связь может охватывать только КУУ либо КУУ и ИМ. В реальных АСР применяют ИМ, которые обладают характеристиками интегрального или пропорционального звена.

Если ИМ является звеном пропорционально действия, то с его использованием может быть реализован любой линейный закон регулирования.

На базе ИМ с характеристиками интегрального звена также может быть реализованы различные зоны регулирования, но только при помощи выбора соответствующих характеристик УОС.

Возможные варианты реализации законов регулирования определяются в зависимости от структурирования регулятора (Рис. 9.1).

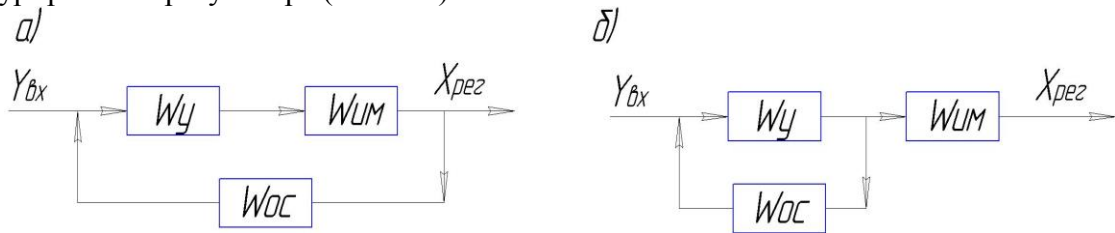


Рис. 9.1 Структурные схемы для реализации законов регулирования.

W_y - передаточная функция КУУ, $W_{ум}$ - передаточная функция ИМ, W_{oc} - передаточная функция УОС.

9.1 Регулятор пропорционального действия, П-регулятор.

$$\text{Уравнение закона регулирования } \delta_{\delta\bar{a}\bar{a}} = k_{\delta\bar{a}\bar{a}} \delta_{\bar{a}\bar{a}} \quad (9-1)$$

$$\text{Передаточная функция П-регулятора } W_{\delta\bar{a}\bar{a}} = k_{\delta\bar{a}\bar{a}} \quad (9-2)$$

Устройство внутренней обратной связи охватывает ИМ (Рис. 9.1,а)

Передаточная функция для данной структуры регулятора

$$W_{p\bar{a}\bar{a}} = \frac{W_y \cdot W_{\bar{e}\bar{i}}}{1 + W_y W_{\bar{e}\bar{i}} W_{oc}} \quad (9-3)$$

Принимаем, что КУУ-пропорциональное звено с коэффициентом усиления $K_y \gg 1$,

Так как передаточная функция КУУ $W_y = k_y$, при том, что $k_y \gg 1$, получим передаточную функцию регулятора

$$W_{p\bar{a}\bar{a}} = \frac{W_y \cdot W_{\bar{e}\bar{i}}}{1 + W_y W_{\bar{e}\bar{i}} W_{oc}} = \frac{1}{W_{oc}} \quad (9-4)$$

$$\text{или } W_{\delta\bar{a}\bar{a}} = k_{p\bar{a}\bar{a}} = \frac{1}{W_{oc}} \quad (9-5)$$

$$\text{Следовательно } W_{oc} = \frac{1}{k_{p\bar{a}\bar{a}}} = \delta \quad (9-6)$$

δ - статизм регулятора, определяющий отклонение $y_{\text{вых}}$ от $y_{\bar{a}\bar{a}}^{\text{ц}\bar{a}}$ в равновесном режиме АСР.

Таким образом, для формирования П - закона регулирования устройство обратной связи П - регулятора должно иметь характеристики пропорционального звена вне зависимости от характеристик ИМ. Такая внутренняя обратная связь называется безинерционной или жесткой обратной связью.

В случае, если обратная связь не охватывает ИМ (Рис. 9.1,б) передаточная функция П-регулятора будет:

$$W_{p\bar{a}\bar{a}} = \frac{W_y}{1 + W_y W_{oc}} \cdot W_{\bar{e}\bar{i}} \quad (9-7)$$

При том же условии что $k_y \gg 1$

Передаточная функция П-регулятора имеет вид.

$$W_{p\dot{a}\ddot{a}} = \frac{1}{W_{oc}} \cdot W_{\dot{e}i} \quad (9-8)$$

Если исполнительный механизм с пропорциональной скоростью перемещения выходного устройства, т.е. его передаточная функция

$$W_{um} = K_{um}, \quad (9-10)$$

$$W_{p\dot{a}\ddot{a}} = \frac{1}{W_{oc}} \cdot k_{\dot{e}i} \quad (9-11)$$

$$\text{Тогда } k_{p\dot{a}\ddot{a}} = \frac{1}{W_{oc}} \cdot k_{\dot{e}i} \quad (9-12)$$

$$\text{Отсюда } W_{i\ddot{n}} = \frac{1}{k_{\delta\dot{a}\ddot{a}}} \cdot k_{\dot{e}i} = \delta K_{\dot{e}i}. \quad (9-13)$$

Следовательно, при ИМ с пропорциональной скоростью внутренняя обратная связь должна быть безинерционной (жесткой) обратной связью.

Если исполнительный механизм имеет характеристики интегрального звена, то его передаточная функция

$$W_{um} = \frac{k_u}{T_u p} \quad (9-14)$$

При этом передаточная функция регулятора:

$$W_{p\dot{a}\ddot{a}} = \frac{1}{W_{oc}} \cdot \frac{k_{\dot{e}}}{\dot{O}_{\dot{e}} \delta} \quad (9-15)$$

Так как передаточная функция П-регулятора $W_{\delta\dot{a}\ddot{a}} = k_{\delta\dot{a}\ddot{a}}$, то

$$k_{p\dot{a}\ddot{a}} = \frac{1}{W_{oc}} \cdot \frac{k_{\dot{e}}}{\dot{O}_{\dot{e}} \delta}, \quad (9-16)$$

а значит передаточная функция УОС

$$W_{i\ddot{n}} = \frac{1}{k_{\delta\dot{a}\ddot{a}}} \cdot \frac{k_{\dot{e}}}{\dot{O}_{\dot{e}} \delta} = \frac{\delta K_{\dot{e}}}{\dot{O}_{\dot{e}} \delta} \quad (9-17)$$

Следовательно УОС должно иметь характеристики интегрального звена. Такая внутренняя обратная связь называется гибкой обратной связью.

9.2 Пропорционально-интегральный регулятор, ПИ-регулятор.

$$\text{Уравнение закона регулирования } \delta_{\delta\dot{a}\ddot{a}} = k_{\delta\dot{a}\ddot{a}} \left(1 + \frac{k_{\dot{e}}}{\dot{O}_{\dot{e}} \delta}\right) \delta_{\dot{a}\ddot{o}} \quad (9-18)$$

$$\text{Передаточная функция Пи-регулятора } W_{p\dot{a}\ddot{a}} = \frac{\hat{E}_{\delta\dot{a}\ddot{a}} (\hat{E}_{\dot{e}} + \dot{O}_{\dot{e}} \delta)}{\dot{O}_{\dot{e}} \delta} \quad (9-19)$$

Если внутренняя обратная связь охватывает исполнительный механизм (Рис. 9.1,а), то передаточная функция ПИ-регулятора

$$W_{\delta\dot{a}\ddot{a}} = \frac{W_y \cdot W_{\dot{e}i}}{1 + W_y W_{\dot{e}i} W_{oc}} \quad (9-20)$$

при тех же условиях

$W_y = k_y$; $k_y \gg 1$ получаем в результате

$$W_{\delta\dot{a}\ddot{a}} = \frac{1}{W_{oc}}, \quad (9-21)$$

$$W_{\delta\dot{a}\ddot{a}} = \frac{k_{p\dot{a}\ddot{a}}(k_{\dot{\delta}} + \dot{\delta})}{\dot{\delta}} = \frac{1}{W_{oc}}, \quad (9-22)$$

а значит передаточная функция УОС будет:

$$W_{oc} = \frac{\dot{\delta}}{k_{p\dot{a}\ddot{a}}(k_{\dot{\delta}} + \dot{\delta})} = \frac{1}{W_{oc}} \quad (9-23)$$

Таким образом, устройство обратной связи должно иметь характеристики реального дифференцирующего звена. Такая внутренняя обратная связь называется гибкой обратной связью и реализуется вне зависимости от типа ИМ:

Если внутренняя обратная связь не охватывает ИМ (Рис. 9.1, б), то передаточная функция ПИ-регулятора будет

$$W_{p\dot{a}\ddot{a}} = \frac{W_y}{1 + W_y W_{oc}} \cdot W_{\dot{\delta}i}, \quad (9-24)$$

при принятых ранее условиях: $W_y = k_y; k_y \gg 1$,

$$\text{Получим } W_{p\dot{a}\ddot{a}} = \frac{1}{W_{oc}} \cdot W_{\dot{\delta}i}, \quad (9-25)$$

Допустим исполнительный механизм с пропорциональной скоростью, его передаточная функция

$$W_{um} = K_{um} \quad (9-26)$$

$$W_{\delta\dot{a}\ddot{a}} = \frac{k_{p\dot{a}\ddot{a}}(k_{\dot{\delta}} + \dot{\delta})}{\dot{\delta}} = \frac{1}{W_{\dot{\delta}i}} k_{\dot{\delta}i}, \quad (9-27)$$

а передаточная функция УОС

$$W_{\dot{\delta}i} = \frac{k_{\dot{\delta}i} \dot{\delta}}{k_{p\dot{a}\ddot{a}}(k_{\dot{\delta}} + \dot{\delta})} = \frac{\delta k_{\dot{\delta}i} \dot{\delta}}{\dot{\delta}} \quad (9-28)$$

Следовательно, УОС должно быть реальным дифференциальным звеном. Такой ПИ-регулятор называется регулятором с упругой обратной связью или изодромным.

Если исполнительный механизм будет с характеристиками интегрального звена, т.е. ИМ с переменной скоростью, то его передаточная функция

$$W_{um} = \frac{k_{um}}{T_u p}, \quad (9-29)$$

а передаточная функция ПИ-регулятора:

$$W_{pez} = \frac{k_p(k_u + T_u p)}{T_u p} = \frac{1}{W_{oc}} \frac{k_u}{T_u p}, \quad (9-30)$$

следовательно, передаточная функция УОС

$$W_{\dot{\delta}i} = \frac{\dot{\delta}}{k_{p\dot{a}\ddot{a}}(k_{\dot{\delta}} + \dot{\delta})} \cdot \frac{k_{\dot{\delta}}}{\dot{\delta}}, \quad (9-31)$$

что соответствует

$$W_{\dot{\delta}i} = \frac{\delta k_{\dot{\delta}i}}{k_{p\dot{a}\ddot{a}}(k_{\dot{\delta}} + \dot{\delta})}, \quad (9-32)$$

т.е. передаточной функции апериодического звена. Таким образом, внутренняя обратная связь является инерционной жесткой обратной связью.

9.3 Выбор типа регулятора.

Во многих случаях возможность выбора регулятора по виду реализуемого в нем закона регулирования ограничена, поскольку большинство систем регулирования предназначено для автоматической стабилизации параметров при весьма ограниченном диапазоне их допустимых отклонений. Выбор закона регулирования осуществляется в зависимости от сложности ОР и требований к точности поддержания регулируемой величины.

В тех случаях, когда допускаются относительно большие колебания регулируемого параметра, целесообразно устанавливать простейшие релейно-пропорциональные регуляторы, работающие по принципу «открыто – закрыто» и реализующие P_n -закон регулирования.

P_n - регуляторы выполняются на базе измерительных приборов (стрелочных, самопишущих), снабженных контактным устройством, усилителем мощности входного сигнала и регулирующей приставкой, которая управляет электромагнитным приводом регулировочного органа.

При наладке этих регуляторов важно соблюдать одно требование $\Delta y_{\text{а\ddot{u}\sigma}}^{\text{i\ddot{a}\ddot{e}\ddot{n}}} \leq \Delta y_{\text{а\ddot{u}\sigma}}^{\text{a\ddot{i}\ddot{i}}}$. То есть максимальное отклонение или ошибка регулируемого параметра в статике не должно быть больше допустимой. Для обеспечения этого условия пропускная способность регулирующего органа при его открытии должна превышать максимально возможное возмущение по нагрузке. Такой способ регулирования называется двухпозиционным – по числу позиций, которые может занимать регулировочный орган. При этом динамические процессы регулирования имеют колебательный характер.

Статическая характеристика P_n -регулятора представлена на Рис.9.2.

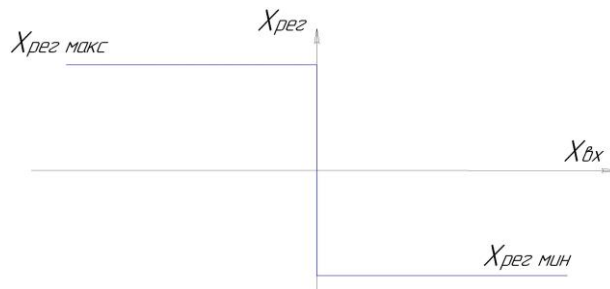


Рис. 9.2 Статическая характеристика P_n -регулятора.

Динамическая характеристика P_n -регулятора имеет вид (Рис 9.3).

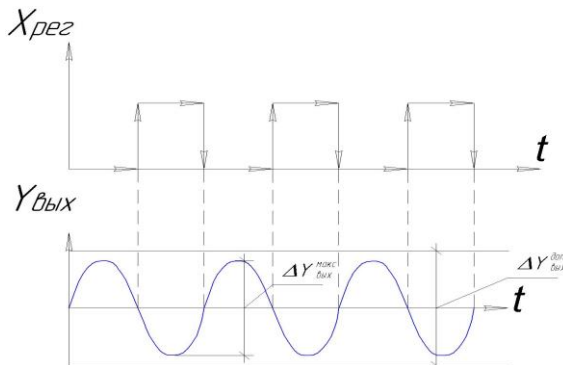


Рис. 9.3 Динамическая характеристика P_n -регулятора.

При более жестких требованиях к автоматической системе регулирования, например, при недопустимости автоколебательных режимов, возникающих в системах с позиционными P_n -регуляторами, целесообразно проверить возможность установки $П$ -регуляторов.

Основанием для установки П-регулятора на объекте с самовыравниванием служит следующее неравенство

$$\delta_{oc}^{opt} \leq \frac{y_{вых}^{уст}}{x_{вх} \left(1 - \frac{\Delta y_{вых}^{дон}}{y_{вых}^{уст}}\right)},$$

где δ_{oc}^{opt} - численное значение оптимальной степени обратной связи регулятора, численное значение которого определяется расчетом;

$y_{вых}^{уст}$ - установившееся значение регулируемой величины, определяется по кривой переходного процесса;

$\Delta y_{вых}^{дон}$ - максимально допустимые по условиям технологического процесса или безопасной работы объекта остаточное отклонение регулируемой величины или ошибка регулирования;

$x_{вх}$ - максимально возможное ступенчатое возмущающее воздействие по нагрузке или эквивалентное возмущению воздействие со стороны регулировочного органа.

Для ОР без самовыравнивания П- регулятор устанавливается при условии, что

$$\delta_{oc}^{opt} \leq \frac{\Delta y_{вых}^{дон}}{x_{вх}};$$

Если P_n и П-регуляторы не удовлетворяют требованиям обеспечения качества регулирования, то применяют регуляторы, в которых реализуется более сложные законы регулирования.

ГЛАВА 10. НАСТРОЙКА РЕГУЛЯТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Настройка регуляторов выполняется в два этапа. Первый этап - статическая настройка, второй этап – динамическая настройка.

10.1 Статическая настройка.

Цель статической настройки – установить точность поддержания заданного значения регулируемой величины в установившемся режиме. В объем статической настройки входят следующие операции:

- балансировка измерительного блока регулятора, которая выполняется совместно с настройкой датчиков таким образом, чтобы выходной сигнал схемы после ИБ был равен нулю при заданном значении измеряемого параметра;

- фазировка сигналов, при этом включение регулятора в сторону «меньше» должно приводить к прикрытию регулировочного органа и наоборот, включение в сторону «больше» к их открытию;

- обеспечение статической точности регулирования, задаваясь значением допустимого изменения регулируемой величины. Обычно принимают, что зона нечувствительности регулятора в единицах регулируемого параметра, должна составлять половину допустимого отклонения этого параметра;

- настройка статического соотношения параметров, которая должна обеспечивать правильное соотношение регулируемых параметров регулирования на входе в КУУ в любой точке регулируемого диапазона АСР;

- отстройка от пульсаций сигналов, выполняемая для стабильной работы регулятора. Значение измеряемых параметров в АСР, например, расхода и давления жидкостей, газов и

уровней в сосудах обычно пульсирует. Это приводит к тому, что в сигналах датчиков таких параметров содержатся случайные колебания – пульсации сигналов. На практике принято считать работу регулятора стабильной, если при отсутствии возмущающих воздействий на объект регулирования регулятор включается под действием самопроизвольных изменений регулируемой величины не более 3 – 4 раз в минуту;

- определение диапазона действия задатчика. Его выбирают по технологически возможному и допустимому диапазону изменения выходной регулируемой величины.

10.2 Динамическая настройка.

Целями динамической настройки является, во первых, обеспечение устойчивости работы АСР, во вторых, получение приемлемого качества переходных процессов.

Обычно настройка рассчитывается для одного из каналов воздействий, по которому регулирование является наиболее чувствительным и может обеспечить компенсацию возмущений, поступающих на объект регулирования по другим каналам. Параметры динамической настройки могут быть получены различными методами, которые условно можно разделить на две группы: экспериментальные и расчетные методы.

Основное преимущество экспериментальных методов в том, что параметры настройки регуляторов определяются непосредственно на действующем оборудовании.

Расчетные методы в некоторых случаях позволяет уменьшить время, затрачиваемое на настройку системы. Расчет настроек предусматривает определение численных значений параметров настройки регуляторов, обеспечивающих достижение требуемого качества регулирования: минимальные динамические и статические погрешности в процессе регулирования, минимальное время регулирования или же минимум линейного (квадратичного) интегрального показателя переходного процесса в замкнутой АСР.

Настройка, обеспечивающая достижение требуемого качества регулирования и удовлетворяющая принятым ограничениям по перемещению регулировочного органа, считается оптимальной.

Исходными данными для расчета настроек служат динамические, в частности, разгонные характеристики объектов регулирования, получаемые при регулирующем воздействии на объект регулирования со стороны регулировочного органа.

При графической обработке переходных (разгонных) характеристик определяются следующие динамические параметры объекта: коэффициент усиления K , постоянную времени T , время запаздывания τ , отношение τ/T , коэффициент пропорциональности интегрирующего звена $K_i=K/T$ для объекта без самовыравнивания.

Для определения настроек регулятора по найденным величинам рекомендуется расчетные формулы (Табл. 10.1) для настроек параметров регулятора при реализации тех или иных законов регулирования: K_p и δ , T_i и T_d . Приведенные в таблице 10.1 настройки рассчитаны на степень затухания $\varphi=0,75$ и минимум квадратичного интегрального критерия $I = \int_0^{T_p} [y(t)]^2 dt$ для процессов регулирования в линейных АСР.

Формулы для расчета настроек являются приближенными, и требуется экспериментальная проверка полученных значений настроек на моделях или в условиях промышленной эксплуатации АСР.

Существуют также полуэкспериментальные методы, в которых количество расчетов настройки сведено к минимальному. Это метод «раскачки» разомкнутой АСР и метод выведения замкнутой АСР на границу устойчивости. Расчетные формулы для настроек регуляторов приведены в таблицах 10.2 и 10.3 соответственно.

$$\hat{E} = \frac{y^{\text{ôñò}}}{\tilde{O}}, \frac{\text{âä.îðêëñ}{\text{âä.âîçîóù}} .$$

$$1) \frac{\tau}{\tilde{O}} = \frac{b}{y^{\text{ôñò}}}$$

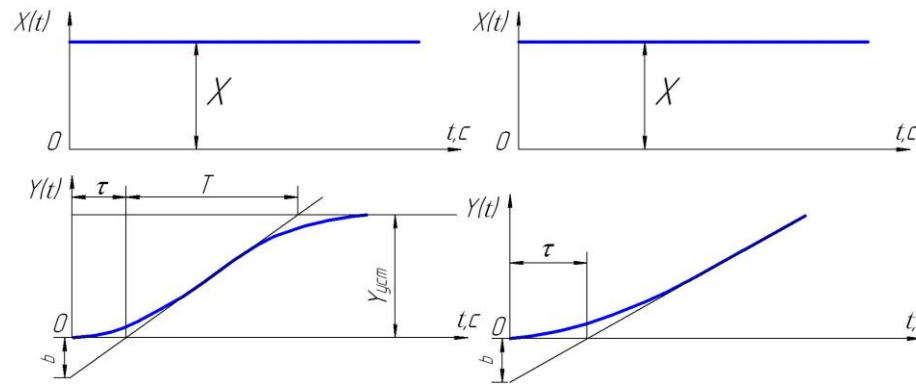


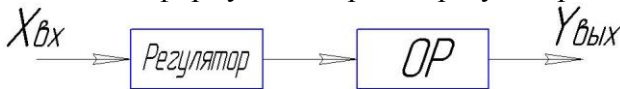
Рис. 10.1 Обработка кривых для определения параметров модели.

$$k_e = \frac{b}{X \cdot \tau}, \frac{\text{âä.îðêëñ}}{\text{âä.âîçîóù}} \cdot \tilde{n}$$

Таблица 10.1

Объект	1) $W_0(p) = \frac{ke^{-p\tau}}{1+T_p}$		$W_0(p) = \frac{ke^{-p\tau}}{1+T_p}$							
	2) $W_0(p) = \frac{ke^{-p\tau}}{p}$		$\frac{\tau}{T} = 0 - 0.2$		$0.2 \leq \frac{\tau}{T} \leq 1.5$		$\frac{\tau}{T} \geq 1.5$			
Настройка	Регулятор									
	П	ПИ	ПИД	П	ПИ	ПИД	П	ПИ	ПИД	
\hat{E}_σ	1) $\frac{1}{\hat{E} \frac{\tau}{\tilde{O}}}$ 2) $\frac{1}{\hat{E}_e \tau}$	1) $\frac{0,9}{\hat{E} \frac{\tau}{\tilde{O}}}$ 2) $\frac{0,9}{\hat{E}_e \tau}$	1) $\frac{1,25}{\hat{E} \frac{\tau}{\tilde{O}}}$ 2) $\frac{1,25}{\hat{E}_e \tau}$	$\frac{0,38}{k} \frac{\tau}{T} + 0.6$	$\frac{\tau}{T} - 0.08$	$\frac{0,22}{k} \frac{\tau}{T} + 1.5$	$\frac{\tau}{T} - 0.13$	$\frac{0,5}{k}$	$\frac{0,5}{k}$	$\frac{0,58}{k}$
T_e, \tilde{n}	-	$3,3\tau$	$2,5\tau$	-	$0,45\tilde{O}$	$0,45\tilde{O}_0$	-	$0,6\tau$	$0,7\tau$	
T_a, \tilde{n}	-	-	$(0,15 - 0,25)\tilde{O}_e$	-	-	$(0,5 - 0,25)\tilde{O}_e$	-	-	$(0,15 - 0,25)\tilde{O}_e$	
T_n, \tilde{n}	$(1 - 4)\tau$		$(0,75 - 2)\tau$	$(1 - 4)\tau$		$(0,75 - 2)\tau$	$(1 - 4)\tau$		$(0,75 - 2)\tau$	

Расчетные формулы настройки регуляторов при раскатке АСР



Автор	ОР с самовыравниванием			ОР без самовыравнивания
	ПИ-регулятор		П-регулятор	П-регулятор
	Кр	Ти	Кр	Кр
Ротач В.Я.	-	-	-	$0,7 \frac{\varphi_{кр}}{Y_{кр}} K'_p$
Рубашкин А.С.	$\frac{1}{3} \frac{\varphi_{кр}}{Y_{кр}} K'_p$	$\dot{\Delta}_{\hat{\epsilon}\delta} (0,2 + 0,06 \hat{E}_0 \frac{\varphi_{\hat{\epsilon}\delta}}{Y_{\hat{\epsilon}\delta}} \hat{E}'_{\delta})$	$0,5 \frac{\varphi_{кр}}{Y_{кр}} K'_p$	-

K'_p - устанавливаемый на время опыта коэффициент П-регулятора

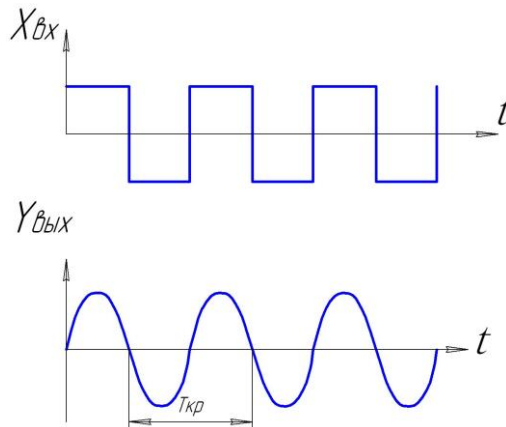
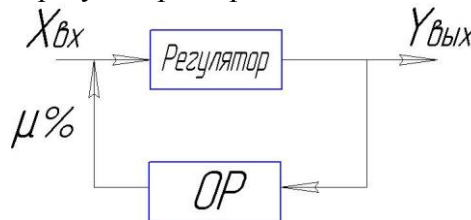


Таблица 10.3

Расчетные формулы настройки регуляторов при выведении АСР на границу устойчивости



Автор	ОР с самовыравниванием			ОР без самовыравнивания
	ПИ-регулятор		П-регулятор	П-регулятор
	Кр	Ти	Кр	Кр
Ротач В.Я.	-	-	-	$0,55 K_{p_{кр}}$
Рубашкин А.С.	$\frac{1}{3} K_{p_{кр}}$	$\dot{\Delta}_{\hat{\epsilon}\delta} (0,2 + 0,06 \hat{E}_0 \hat{E}'_{\delta \hat{\epsilon}\delta})$	$0,5 K_{p_{кр}}$	-

$K_{p_{кр}}$ – коэффициент усиления регулятора, при котором получены критические колебания.
 μ - перемещение регулировочного органа, %.

ГЛАВА 11. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Электрические средства автоматического регулирования широко используются в энергетике и других отраслях промышленности. К числу достоинств этих средств относятся: простота энергоснабжения; возможность преобразования регулируемых величин различной физической природы в электрический сигнал и передачи его на значительное расстояние; возможность формирования разнообразных алгоритмов функционирования с широким диапазоном изменения параметров настройки регуляторов; удобство централизации управления технологическими процессами; возможность построения сложных систем управления, в том числе многоуровневых с использованием ЭВМ, реализованных в АСУ ТП.

Электрические средства автоматизации в своем развитии насчитывает четыре поколения. При их эволюции произошли значительные изменения в электронной базе, конструктивном исполнении, функциональном составе, технологических характеристиках и сигналах связи.

Первое поколение электрических средств автоматизации характеризуется применением электронных ламп для усиления и преобразовании сигналов, использованием индивидуальных измерительных приборов с естественным (не унифицированным) сигналом связи. Основным типом регулирующих приборов первого поколения были РПИБ – регулирующий прибор импульсного действия с бесконтактным выходом и РПИК – тот же прибор, но с контактным выходом.

Второе поколение электрических средств автоматизации отличается применением полупроводниковых элементов и переходом к блочно-модульному принципу конструирования приборов с унификацией корпусов отдельных блоков и преимущественным использованием унифицированных сигналов связи, главным образом токового сигнала 0 – 5 мА.

В схеме регулирующих приборов этого поколения аппаратура серии РП-2 Чебоксарского завода электрических исполнительных механизмов и комплекс блоков под общим названием «КАСКАД» Московского завода тепловой автоматики.

Третье поколение характеризуется использованием в качестве элементной базы интегральных микросхем. Это «в частности» агрегатный комплекс электрических средств регулирования «АКЭСР».

К четвертому поколению электрических средств автоматизации относятся программируемые регуляторы с автоматической переменной настройкой в зависимости от свойств объекта регулирования «ПРОТАР», «РЕМИКОНТ». В их числе системы приборов автоматического регулирования «РЕМИКОНТ» и «ПРОТАР».

11.1 Электрическая унифицированная система приборов автоматического регулирования «КАСКАД».

Конструктивно структурная схема системы «КАСКАД» состоит из: измерительного и нормирующего блоков, функциональных и регулирующих блоков, исполнительных механизмов, оперативных и вспомогательных устройств. (Рис. 11.1)

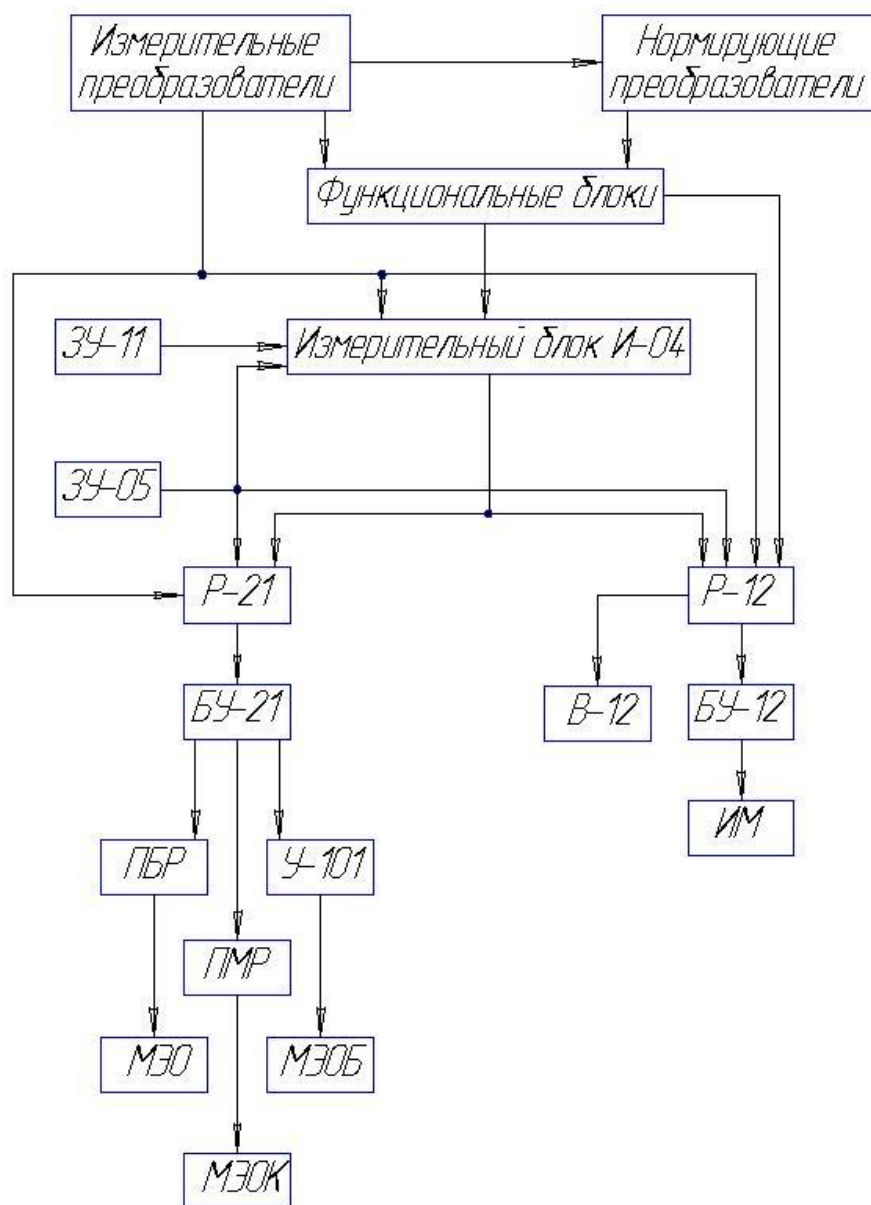


Рис. 11.1 Функциональная структурная схема системы «КАСКАД»

Входные сигналы поступают от первичных измерительных преобразователей (датчиков) с унифицированными токовыми сигналами 0-5 мА.

От датчиков с не унифицированными токовыми сигналами сигналы подаются на преобразователи, которые преобразуют их в унифицированные сигналы.

Унифицированные токовые сигналы, пропорциональные значениям регулируемой величины, могут поступать на вход соответственно функциональных блоков, измерительного блока или непосредственно на регулирующие блоки Р-21 и Р-12.

По своему функциональному назначению все устройства, относящиеся к аппаратуре «КАСКАД», делят на следующие группы: статического преобразования информации; динамического преобразования информации; оперативного управления; исполнительные механизмы; вспомогательные устройства.

Устройства статического преобразования информации. Функциональные блоки. Блок суммирования А-04 – обеспечивает суммирование 4-х токовых сигналов 0-5мА, выдача результата также в виде токового сигнала 0-5мА. Блок умножения А-31 – выполняет

операции умножения двух сигналов. Блок деления двух токовых сигналов $I_{\text{вых}} = \frac{I_1}{I_2}$, блок А-

32. Блок извлечения корня А-33 – выполняет операцию извлечения квадратного корня в соответствии с зависимостью $I_{\text{вых}} = \sqrt{5I_{\text{вх}}}$. Блок ограничения Н-02 – предназначен для применения в схемах автоматического регулирования в качестве устройства, обеспечивающего ограничение токового сигнала по минимуму и максимуму. Блок аналого-релейного преобразования Л-02 – реализует характеристику 2-х позиционного реле с зоной возврата. Используется в схемах синхронизации хода двух исполнительных механизмов и других схемах регулирования. Блок нелинейных преобразований БНП-04 – предназначен для воспроизведения статической функциональной зависимости $I_{\text{вых}} = F(I_{\text{вх}})$ с помощью кусочно-линейной аппроксимации из шести участков. Блок дифференцирования Д-01 – реализует передаточную функцию. Используется обычно в каскадных системах регулирования (регулирования температуры и давления пара). Блок динамического преобразования Д-03 – обеспечивает реализацию передаточной функции одного из следующих звеньев: реального дифференцирующего звена; идеального дифференцирующего звена; аperiodического, интегрирующего и пропорционального звена. Особенностью блока является возможность дистанционного дискретного изменения коэффициента передачи и постоянной времени этих звеньев.

1-2 Измерительный блок И-04 осуществляет суммирование четырех токовых сигналов 0-5 мА. Служит для формирования сигнала рассогласования между сигналом задания входным и выходным сигналами.

Устройства динамического преобразования информации. Регулирующий блок аналоговый Р-12 – обеспечивает формирование выходного сигнала постоянного тока 0-5 мА, связанного с входными сигналами пропорциональным (П), пропорционально-интегральным (ПИ), и ПИД законом регулирования и имеет ограничитель выходного сигнала по min и по max, а также обеспечивает сглаживание (демпфирование) пульсаций входных сигналов.

Регулирующий блок релейный Р-21 служит для формирования импульсов управления электрическими ИМ постоянной скорости, в комплекте с которыми обеспечивает ПИ закон регулирования.

Устройства оперативного управления. Устройство задающее потенциометрическое ЗУ-11 предназначено для оперативного изменения задающего значения регулируемой величины с пульта управления. Устройство, задающее токовое ЗУ-05 – обеспечивает формирование задания в виде унифицированного токового сигнала 0-5мА с ручным управлением. Применяется в тех случаях, когда в системе регулирования отсутствует измерительный блок и требуется распределение сигнала задания нескольким потребителям. Блок управления аналогового регулятора БУ-12 – предназначен для переключения выходных цепей регулирующего блока Р-12 с автоматического регулирования на ручное и обратно. Блок управления релейного регулятора БУ-21 – позволяет реализовывать следующие функции:

- переключение цепей управления ИМ постоянной скорости при работе его в комплекте с релейным регулирующим блоком Р-21 с возможностью установки трех режимов: автоматического управления; ручного управления, внешнего управления с блочного щита управления (БЩУ). Блок селектирования БСЛ-04 обеспечивает выделение наибольшего и наименьшего токового сигнала.

Исполнительные устройства и механизмы. В соответствии с двумя разновидностями регулирующих блоков Р-21 и Р-12 в системе «КАСКАД» имеется два вида

усилителей мощности: для усиления аналогового сигнала 0-5мА и дискретного сигнала 0; 24В.

Аналоговый усилитель мощности У-252 используется в комплекте с блоком Р-12 и предназначен для управления объектами, требующими непрерывного измерения электрического сигнала. Релейные усилители мощности используются в комплекте с релейными регулирующими блоками и электрическими ИМ постоянной скорости.

В системе «КАСКАД» с регулирующим блоком Р-21 ИМ снабжаются пусковыми устройствами. Пусковые устройства обеспечивают необходимое усиление мощности управляющих сигналов, поступающих от регулирующего блока, при автоматическом регулировании или при ручном управлении от оператора.

При использовании электрических исполнительных механизмов постоянной скорости управляющие сигналы носят характер импульсов одинаковой амплитуды.

Пусковые устройства могут быть контактные и бесконтактные. Каждый тип пускового устройства рассчитан на работу в комплекте с определенным типом исполнительного механизма. С ИМ типа МЭОБ (механизм электрический однооборотный бесконтактный) используется теристорный усилитель мощности релейного типа У-101. С ИМ типа МЭО (механизм электрический однооборотный) – пускатель бесконтактный реверсивный ПБР-2. С ИМ типа МЭОК (механизм электрический однооборотный контактный) – пускатель магнитный реверсивный ПМРТ.

Контактные пусковые устройства - пускатель магнитный реверсивный предназначен для управления трехфазным асинхронным электродвигателем переменного тока мощностью 0,27 кВт, при напряжении 220/380 В, либо электродвигатель мощностью 0,4-1 кВт типа МЭОК.

Бесконтактные пусковые устройства (ПБР) применяют для бесконтактного управления электроприводом, используя при этом магнитный или тиристорный усилитель.

Переход на бесконтактные пусковые устройства связан с недостаточной надежностью контактных магнитных пускателей. В тиристорном и магнитном усилителях сигнал, поступающий от регулируемого блока, усиливается до уровня, достаточного для управления исполнительным механизмом.

В состав ИМ входят: асинхронный электродвигатель (2-х или 3-х фазный), редуктор, концевые или путевые выключатели, датчики положения, тормозное устройство, ручной привод.

Электродвигатель с регулятором служит для преобразования электрической энергии в механическую, достаточную для преодоления сил сопротивления от действия среды со стороны регулировочных органов.

Концевые выключатели - используются для отключения пускового устройства при достижении регулировочным органом крайних положений, тем самым, они выполняют защитные функции.

Путевые выключатели служат для ограничения диапазона перемещения регулировочного органа в автоматическом режиме.

Датчики положения - формируют сигнал, пропорциональный углу поворота выходного устройства-вала ИМ. Этот сигнал подается на индикатор положения на пульте оператора, а так же может быть использован в системе управления в качестве сигнала обратной связи по положению регулировочного органа.

Тормозное устройство- устанавливается в ИМ для уменьшения выбега выходного вала в процессе останова электродвигателя.

Ручной привод служит в ИМ для обеспечения возможности перемещения регулировочного органа при входе из строя пускового устройства.

Параметры сигналов связи регулирующих блоков, пусковых устройств и исполнительных механизмов стандартизованы, поэтому один и тот же тип исполнительных устройств может использоваться с различными системами регулирования.

Исполнительные механизмы типа МЭО имеют наибольшее распространение среди электрических ИМ постоянной скорости в составе релейно-импульсных регуляторов. МЭО состоит из 2-х фазного асинхронного электродвигателя (типа ДАУ) многоступенчатого зубчатого редуктора, электромагнитного тормоза и датчика перемещения. Частота вращения выходного вала редуктора при работе электродвигателя постоянна, но может меняться путем изменения передаточного отношения редуктора. Угол полного перемещения выходного вала может устанавливаться в диапазоне 0-90° и 0-240°. Фрикционная муфта электрического тормоза расположена на валу электродвигателя и прижата к нему пружиной. При появлении управляющего сигнала пружина вновь прижимает муфту к валу, при этом разгон и выбег выходного вала находятся в пределах 0,5-1 градуса.

Исполнительные механизмы типа МЭОК предназначены для контактного управления электроприводом и перемещения регулировочных органов АСР. В соответствии с управляющими сигналами, поступающими от регулирующего блока. В корпусе ИМ размещается тихоходный редуктор с электроприводом и узел ручного привода – дублера, а так же датчик перемещения с унифицированным токовым выходным сигналом 0-5 мА и два концевых выключателя.

Исполнительные механизмы типа МЭОБ предназначен для бесконтактного управления сервоприводом и снабжен электромагнитным тормозом, подключенным параллельно обмоткам статора электродвигателя.

Вспомогательный устройства системы «КАСКАД». Блок указателей В-12 содержит два стрелочных индикатора один из которых используется для контроля выходного сигнала аналогового регулирующего прибора Р-12 или в качестве индикатора положения ИМ, а второй для контроля сигнала рассогласования на входе в Р-12. Блок сигнализирующих приставок В-21, используемых при работе релейного регулирующего блока Р-21 с магнитным пускателем ПМР-69.

11.2 Агрегатный комплекс электрических средств регулирования «АКЭСР».

«АКЭСР» по сравнению с другими комплексами средств автоматического регулирования имеет ряд особенностей, основные из которых следующие:

- широкое использование интегральных микросхем специального и общего назначения, благодаря чему сокращаются габариты отдельных модулей и обеспечивается высокая надежность устройств.

- повышение функциональности и насыщенности отдельных блоков. Каждый блок АКЭСР может выполнять обычно несколько функций одновременно, что приводит к сокращению общего числа блоков в схеме управления. Расширение функциональных возможностей системы управления, среди которых выполнение дистанционного изменения параметров динамической настройки параметров регулирующих блоков.

- выполнение дистанционного и автоматического переключения режима работы схемы регулирования с помощью блоков управления. Широкий выбор унифицированных электрических сигналов связи - токовых и напряжения.

Блочный модульный принцип агрегатированного построения «АКЭСР» позволяет проектировать и применять комплексные АСР практически любой сложности с различными вычислительными и логическими функциями.

Функциональная структурная схема «АКЭСР». По функциональному назначению комплекс АКЭСР содержит следующие блоки: кондуктивного разделения, функциональные, регулирующие, оперативного управления и исполнительные устройства.

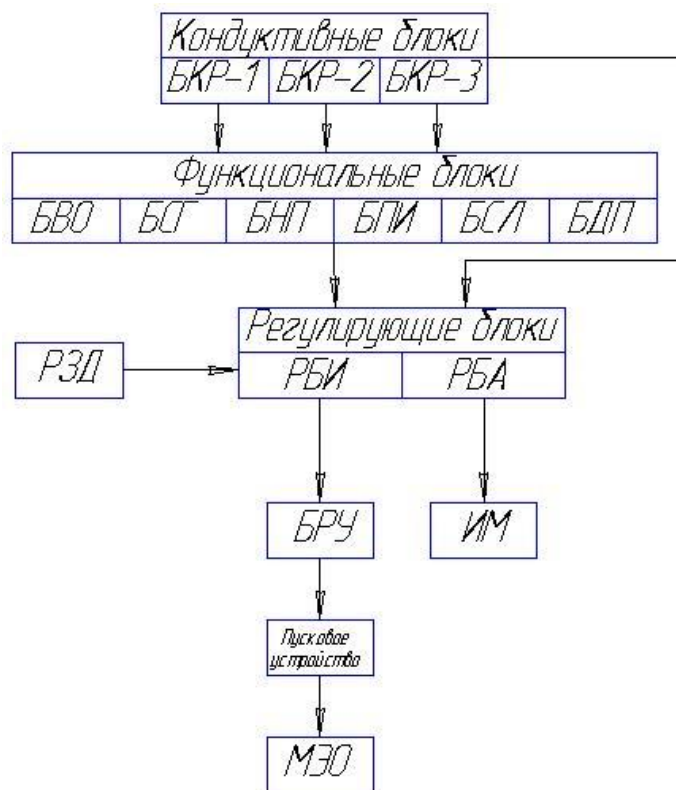


Рис. 11.2 Функциональная структурная схема «АКЭСР».

Блоки кондуктивного разделения (БКР). БКР образуют группу устройств ввода – вывода информации. В каждом из 3-х модификаций БКР производится преобразование токового сигнала (0-5; 0-20; 4-20 мА) в сигнал напряжения (0-10В), а так же демпфирование (сглаживание) сигнала или дифференцирование с помощью реального дифференциального звена с постоянной времени $T=0,24с$ и коэффициентом усиления $K=0,5-24$. Блок *БКР-1* в дополнение к общим функциям выполняет алгебраическое суммирование 3-х сигналов с масштабированием 2-х из них. Блок *БКР-2* отличается тем, что имеет два независимых идентичных канала, каждый из которых реализует указанные выше функции.

Блок *БКР-3* в дополнение к общим функциям так же обеспечивает двухпредельную сигнализацию с независимой установкой порогов срабатывания и контактным выходом. Для ввода сигналов в систему регулирования может применяться та из модификаций БКР, которая в большей степени отвечает функциональной структуре схемы. Если специальная функция не требуется, то используют БКР-2 для сокращения количества аппаратуры. Для вывода аналоговых сигналов из схемы регулирования с выдачей токового сигнала предназначен блок БКР-1.

Функциональные блоки. Функциональные блоки предназначены для статического преобразования информации.

Блок вычислительных операций является универсальным вычислительным устройством и обеспечивает выполнение следующих операций: умножение двух сигналов; возведение в квадрат; деление двух сигналов; извлечение квадратного корня; кроме того блок содержит два сумматора входных сигналов;

БСГ – блок сигнализации служит для сигнализации о достижении установленных значений. Позволяет реализовать релейную характеристику (Рис. 11.3) двухпозиционную (а) трехпозиционную (б).

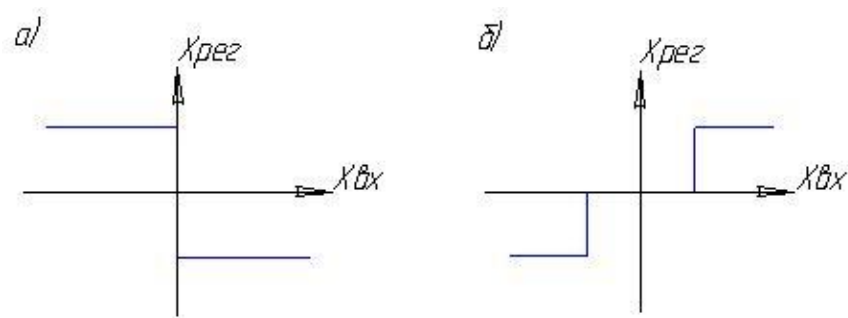


Рис. 11.3 Релейные характеристики

БНП – блок нелинейных преобразователей позволяет реализовать нелинейную зависимость выходного сигнала от входного $X_{\text{рез}} = f(x_{\text{вх}})$ путем кусочно-линейной аппроксимации из шести участков, обеспечивает суммирование двух сигналов с масштабированием одного из них.

БСЛ – блок селектирования – содержит 4 сумматора с умножением на постоянный коэффициент. Блок позволяет: выделять наибольший и наименьший сигнал из комбинации входных сигналов; воспроизводить простейшие нелинейные зависимости, как ограничение выходного сигнала, зона нечувствительности и др;

Все рассмотренные блоки статического преобразования информации рассчитаны на сигналы по напряжению.

Функциональные блоки динамического преобразования информации. БПИ - блок прецизионного интегрирования - служат для преобразования дискретного входного сигнала в аналоговый выходной и интегрирования аналогового сигнала с логическим управлением и сохранением информации в перерывах питания.

БДП – блок динамических преобразователей может выполнять одновременно функции сумматора и интегратора, либо дифференциатора.

Устройства динамического преобразования информации – регулирующие блоки. Регулирующий блок импульсный (РБИ) предназначен для формирования ПИ и ПИД законов регулирования в автоматах регуляторах, содержащих ИМ постоянной скорости.

Выпускаются три основные разновидности РБИ отличающиеся дистанционной подстройки параметров регулятора: постоянной времени интегрирования $T_{\text{и}}$ и скорости связи $V_{\text{св}}$, скорости заряда RC-цепочки обратной связи.

РБИ – 1 не имеет дистанционной подстройки параметров.

РБИ – 2 обеспечивает дистанционную подстройку параметров $V_{\text{св}}$ и $T_{\text{и}}$.

РБИ – 3 обеспечивает аналоговую дистанционную подстройку параметров.

Регулирующий блок аналоговый РБА – обеспечивает формирование сигнала рассогласования и его динамическое преобразование в выходной аналоговый (плавно меняющийся) сигнал в соответствии с П-, ПД-, ПИД- или ПИД- законом регулирования с ограничением выходного сигнала по верхнему либо нижнему уровню. Блок обеспечивает переключение с режима ручного управления на автоматический и обратно. Блок РБА имеет 5 входов для аналоговых сигналов по напряжению и два входа для сигналов по току и выходы как по напряжению, так и по току.

Блоки оперативного управления и исполнительные устройства. Ручные задатчики РЗД и РЗД-К которые обеспечивают ручную установку задания в виде унифицированного аналогового сигнала по току или по напряжению.

Задатчик РЗД-к кнопочный содержит дистанционный переключатель на два положения с импульсным управлением, а так же кнопку для ручной установки

переключателя в одно из положений. Блок ручного управления БРУ служит для перевода управления ИМ с ручного на автоматическое и обратно, а так же для работы ИМ в режиме ручного управления. Блок имеет три кнопки: Кн. А – включение автоматического режима. Кн. «Меньше» - ручное управление в сторону «меньше». Кн. «Больше» - ручное управление в сторону «больше».

БРУ имеет модификации по исполнению и функциям, так, например, БРУ-У имеет встроенный указатель для индикации выходного сигнала регулирующего блока РБА, интеграторов БПИ и БДП, а так же для индикации положения ИМ при наличии соответствующего датчика положения с унифицированным сигналом.

В системе «АКЭСР» используются те же исполнительные устройства, что и в аппаратуре «КАСКАД», благодаря унификации выходных сигналов регулирующих блоков.

11.3 Система приборов автоматического регулирования «РЕМИКОНТ».

«РЕМИКОНТ» это регулирующие микропроцессорные контроллеры. Они представлены тремя сериями: $P-110$; $P-120$; ; $P-130$.

Контроллеры «РЕМИКОНТ» серии $P-110$; $P-120$ представляют собой микропроцессорные устройства управления, архитектура которых оптимизирована для решения задач автоматического регулирования технологических процессов в энергетической, металлургической, химической и др. отраслях промышленности.

Основные функции контроллеров $P-110$; $P-120$: локальное, каскадное, программное, многосвязное регулирование, управление с переменной структурой; формирование ПИД- законов регулирования; выполнение разнообразных статических и динамических преобразований аналоговых сигналов; обработка и формирование дискретных сигналов; выполнение всех алгоритмических задач, которые решаются с помощью традиционных аналоговых приборов автоматического регулирования; формирование программно-изменяющихся во времени сигналов; выполнение операций управляющей логики.

В состав серии $P-110$ входят две модели контроллеров: модель $P-110$ -одиночный «РЕМИКОНТ» и дублированный «РЕМИКОНТ»- модель $P-112$, каждый из которых рассчитан на большое (40-200) число входных- выходных сигналов.

В состав серии $P-120$ также входят две модели контроллеров: одиночный «РЕМИКОНТ» $P-120$ и дублированный – модель $P-122$ на среднее (15-90) число входных - выходных сигналов.

Технические характеристики контроллеров $P-110$ и $P-120$:

- количество сигналов ввода: аналоговых-64, дискретных-126;
- количество сигналов вывода: аналоговых-64, дискретных-126, импульсных-64;
- количество выполняемых функций (алгоритмов) -45;
- входные сигналы: аналоговые постоянного тока 0–5, 0–20, 4–20 мА, напряжения постоянного тока –10–0+10 В, дискретные напряжением 24 В;
- выходные сигналы: аналогичные входным, дискретные рассчитаны на максимальное напряжение 48 В и максимальный ток нагрузки 0,2 А;
- питание от сети переменного тока напряжением 220, 240 В при частоте 50, 60 Гц;
- потребляемая мощность -120 ВА;
- время сохранения информации при отключении питания -360 часов;
- точность установки сигнала задания -0,1% .

Контроллер «РЕМИКОНТ» $P-130$ малоканальный многофункциональный регулирующий.

«Ремиконт» серии Р-130 предназначен для построения современных автоматизированных систем управления технологическими процессами и позволяет выполнять оперативное управление с использованием персональных ЭВМ, автоматическое регулирование, автоматическое логико-программное управление, автоматическое управление с переменной структурой, защиту и блокировку, сигнализацию, регистрацию событий.

Контроллер Р-130 применяется для управления сложными технологическими процессами с большим числом контролируемых параметров и управляющих сигналов. Он имеет проектную компоновку, которая позволяет пользователю выбрать нужный набор модулей и блоков согласно числа и вида входных-выходных сигналов. Входные сигналы от термопар ТХК, ТХА, ТПР, ТВР, ТИП, сигналы от термометров сопротивления ТСМ, ТСР; унифицированные аналоговые сигналы постоянного тока 0–5, 0–20, 4–20 мА; 0–10 В; дискретные сигналы. Выходные сигналы: постоянного тока, аналогичные входным, дискретные.

Напряжение питания от сети переменного тока 220 или 240 В; постоянного тока 24 В.

Время сохранения информации при отключении питания -168 часов. Потребляемая мощность-15 ВА.

ГЛАВА 12. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

Особенности котельных агрегатов как объектов регулирования. Котельные агрегаты являются сложными объектами автоматического регулирования с большим числом регулируемых параметров и регулирующих воздействий. Котлы обладают значительной аккумулирующей способностью тепловой энергии в воде, паре и металле пароводяного тракта. Наконец, котельные агрегаты характеризуются значительными скоростями протекания процессов в пароводяном тракте. Так, снижение уровня воды в барабане котла на 100 мм при полной паропроизводительности котельного агрегата с прекращением подачи питательной воды происходит за 20 с.

Показателями течения тепловых процессов на котельном агрегате являются регулируемые параметры. В их числе внешние: расход пара, давление пара при выходе из котла, температура перегрева пара и внутренние: уровень воды в барабане котельного агрегата, коэффициент избытка воздуха, разрежение в топке и др.

Характер течения процессов в котельном агрегате определяется видом и величиной воздействий: внешних – со стороны потребителя, внутренних – изменение состава и качества топлива, избытка воздуха, подаваемого в топку котла, разрежения в топке, изменение расхода питательной воды.

Задачи регулирования котельных агрегатов. К задачам регулирования котельных агрегатов, которые диктуются как требования потребителей пара, так и необходимостью обеспечения надежного и экономичного режима работы самих котлов, относятся следующие:

- приведение нагрузки котельного агрегата в соответствие с заданием;
- поддержание заданных значений давления и температуры пара, поступающего потребителю;
- поддержание такого соотношения между подачами топлива и воздуха, а для котлов с шахтно-мельничными топками такого распределение первичного и вторичного воздуха, которое отвечает наивысшей экономичности топочного процесса;
- стабилизация разрежения в топке;
- поддержание в барабанных котельных агрегатах постоянного уровня воды в барабане в установленных пределах, а также соледержания котловой воды;

Для котлов прямоточного типа, кроме перечисленных выше:

- поддержание заданных значений влажности и температуры пара по водопаровому тракту и в первую очередь в районе переходной зоны, где должно происходить отложение солей, во избежание перемещения этой зоны в область радиационного обогрева;
- поддержание в котельных агрегатах с промывочно-сепарационной схемой определенной влажности пара перед сепаратором;

Перечисленные задачи решаются путем воздействия на регулировочные органы котельного агрегата, управляющие подачами питательной воды, топлива, общего, а при шахтно-мельничных топках и первичного воздуха, отсосом дымовых газов, подачей охлаждающей воды на парохладители или другими средствами регулирования температуры пара, величиной непрерывной продувки воды из барабана котлоагрегата.

Паровой котел как объект регулирования. Паровой котел представляет сложную динамическую систему с несколькими взаимосвязанными входными и выходными величинами. Однако выраженная направленность участков регулирования по основным каналам регулирующих воздействий позволяет осуществлять стабилизацию и изменение регулируемых параметров с помощью независимых одноконтурных систем, связанных через объект регулирования – котельный агрегат.

Автоматическая система регулирования (АСР) барабанного парового котла в целом состоит из отдельных замкнутых контуров:

- давления перегретого пара и тепловой нагрузки;
- экономичности процесса горения топлива;
- разрежения в верхней части топки;
- температуры перегретого пара;
- питания котловой водой;
- качества котловой воды.

Требования высокой точности регулирования параметров для обеспечения надежной и экономичной работы котельного агрегата обуславливает необходимость применения быстродействующих автоматических регулирующих устройств. В регулировании котлоагрегатов широко применяются электрические схемы с электронными регуляторами. В качестве исполнительных механизмов используются электромеханические сервоприводы с редукторами и колонки дистанционного управления.

12.1 Автоматическое регулирование процесса горения барабанных котлов.

Функции приведения нагрузки котла к заданному значению, функции обеспечения соответствия между подачами топлива и воздуха, стабилизации разрежения в топке возлагаются на регуляторы топлива, воздуха и тяги, комплекс которых называется «регуляторами процесса горения».

Регулирование подачи топлива. В каждый момент времени в топке котла должно сгорать столько топлива, чтобы количество пара, вырабатываемого котельным агрегатом, соответствовало количеству потребляемого пара, т. е. внешней нагрузке котельного агрегата. Показателем такого соответствия является давление пара при выходе из котла.

Если при сгорании топлива выделяется больше тепла, чем это необходимо для производства потребляемого количества пара, то излишнее тепло аккумулируется в котле, что приводит к росту давления. Наоборот, если топливо подается в недостаточном количестве, то потребность в паре покрывается частично за счет тепла, аккумулированного в

котловой воде, а давление пара при этом падает. Таким образом, подача топлива должна производиться так, чтобы обеспечить постоянное давление пара при выходе из котла.

Регулирование подачи воздуха. Подача воздуха в топку должна обеспечить наиболее экономичный режим горения топлива. Для этого требуется поддерживать соответствие между количеством и качеством подаваемого топлива, с одной стороны, и количеством воздуха, необходимого для горения, с другой. Показателем этого соответствия является коэффициент избытка воздуха в топке α_T , который контролируется по данным газового анализа.

Оптимальное значение избытка воздуха зависит от вида топлива, способа его сжигания, конструкции топочного устройства, нагрузки котельного агрегата. В конкретных условиях оптимальное значение α_T при различных нагрузках определяется на основании испытаний котельного агрегата.

Значение α_T можно оценить по содержанию свободного кислорода O_2 в дымовых газах, покидающих топочную камеру.

$$\alpha_T = 21 / 21 - O_2$$

Содержание O_2 определяют в поворотной камере газохода за пароперегревателем в %. Оптимальное значение O_2 при номинальной нагрузке при сжигании пылевидного топлива – 3-5 %, при сжигании мазута и газа - 0,2-2 %, при этом $\alpha_T = 1,2 - 1,3$.

Значительное увеличение избытка воздуха против оптимального приводит к росту потерь тепла с уходящими газами Q_2 , а чрезмерное снижение избытка воздуха увеличивает потери с химической неполнотой сгорания Q_3 .

Регулирование тяги. Регулирование тяги должно обеспечивать полное удаление продуктов сгорания.

В статических (равновесных) режимах производительность дымососов должна в каждый момент времени соответствовать производительности дутьевых вентиляторов. Показателем этого соответствия служит разрежение в топочной камере.

Допускать в топке котельного агрегата избыточное давление нельзя, за исключением котлоагрегатов, работающих под наддувом, т. к. это вызывает выбивание газов и пламени из топки.

С другой стороны, при значительном разрежении в топке возрастают присосы воздуха, снижающие экономичность работы котла за счет потерь с уходящими газами – Q_2 и увеличения расхода электроэнергии на работу дымососов.

Разрежение в различных зонах топочного пространства котельного агрегата по высоте топочной камеры неодинаково. Вследствие явления самотяги разрежение в верхней части топки бывает обычно примерно на 0,1 кПа больше, чем в нижней. Поэтому поддерживают необходимое минимальное разрежение в верхней части топочной камеры.

12.2 Схемы регулирования процесса горения паровых барабанных котлов.

В связи с большим конструктивным разнообразием топочных устройств и систем подачи топлива для котлов, работающих на разных видах топлива, существенно различаются и схемы регулирования процесса горения, обеспечивающие заданную тепловую нагрузку котельного агрегата.

Наиболее распространенными являются системы регулирования процесса горения для котлов с пылепитателями, шахтно-мельничными топками и для котлов, работающих на жидком и газообразном топливе.

В первых простейших схемах регулирования процесса горения в качестве критерия тепловой нагрузки было использовано положение органа, регулирующего подачу топлива, h_T (рис. 12.1,а). Этот импульс являлся обратной связью для регулятора топлива, к которому поступал задающий сигнал от регулятора давления при выходе из котла или от главного (корректирующего) регулятора, действующего по давлению в магистрали, при параллельной работе нескольких котлов на общий паропровод. Сигнал по положению регулировочного органа подачи топлива, в качестве задающего, подавался на регулятор воздуха, к которому поступал также сигнал обратной связи по расходу воздуха (V). Разрежение в топке (S_T) поддерживалось независимым регулятором тяги. Такая схема регулирования процесса горения, когда расход воздуха приводится в соответствие с расходом топлива, носит название «топливо-воздух».

Недостатком описанной выше схемы регулирования процесса горения в первую очередь является непредставительность принятого метода оценки фактической тепловой нагрузки котла, в первую очередь для котлов, сжигающих твердое топливо, из-за возможного изменения качества топлива, нестабильности характеристик пылепитателей и т.д. Эти факторы приводили к резкому нарушению экономичности топочного процесса и отклонению действительной нагрузки от заданной. Недостатки схемы привели к отказу от схемы «топливо-воздух» с использованием сигнала по положению регулировочного органа подачи топлива для котлов, сжигающих угольную пыль.

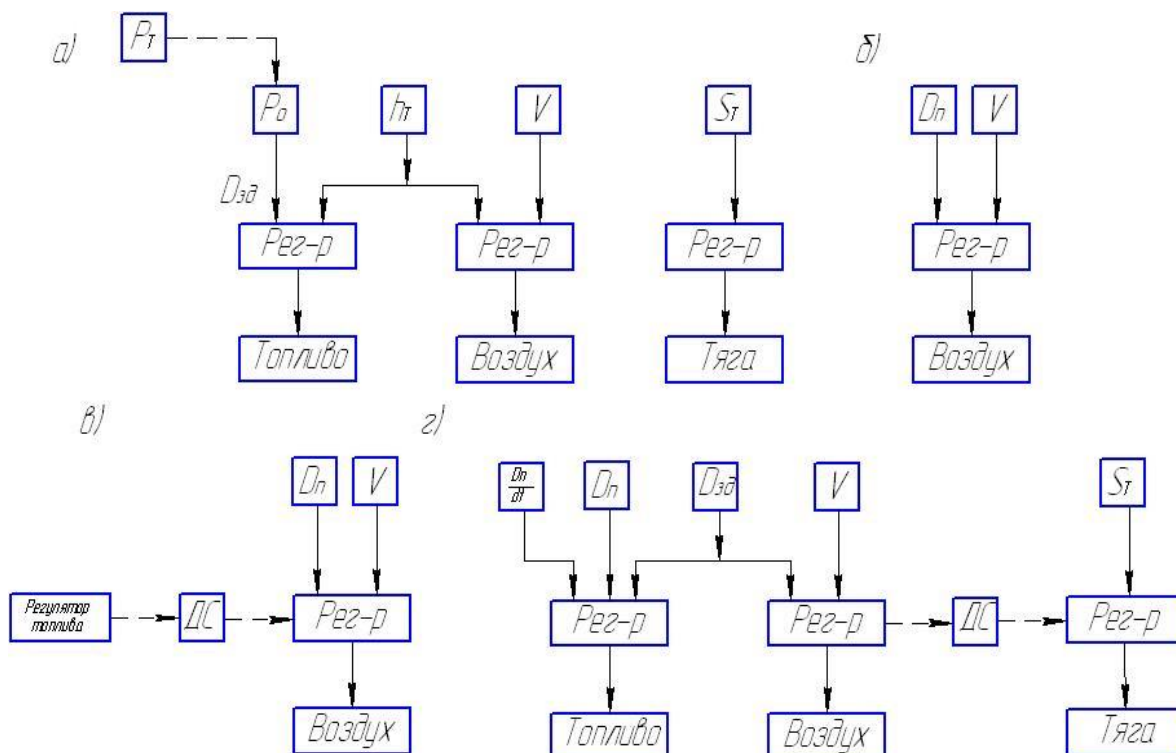


Рис. 12.1 Структурные схемы регулирования процесса горения.

P_T – давление в общем паропроводе, P_0 – давление первичного пара, $D_{зад}$ – задание, $h_{мон}$ – положение регулировочного органа подачи топлива, D_n – расход первичного пара, V – расход воздуха, S_T – разрежение в топке котла, $\frac{dp}{dt}$ – скорость изменения давления пара, ДС – динамическая связь.

Схему «топливо-воздух» сменила схема, организованная по принципу «пар-воздух» (рис. 12.1,б), где задающим сигналом регулятору воздуха служит расход пара при выходе из котла (D_n).

При постоянстве температуры питательной воды, теплосодержания пара, КПД котлоагрегата и при сжигании односортного топлива расход пара в статике практически однозначно задает теоретически необходимый для горения расход воздуха. Поэтому при установившихся режимах схема «пар-воздух» обеспечивает удовлетворительную точность поддержания заданного коэффициента избытка воздуха, определяющего фактора экономичности топочного процесса.

Однако в переходных режимах, связанных с изменением аккумулированного в котле тепла, расход пара не согласуется с фактической тепловой нагрузкой котла, и оптимальное соотношение между подачами топлива и воздуха нарушается.

Полезным усовершенствованием схемы «пар-воздух» является использование динамической связи (исчезающего импульса) от регулятора топлива к регулятору воздуха (рис 13.1.в). Динамическая связь действует только в переходных режимах и не оказывает остаточного воздействия на измерительную схему регулятора воздуха.

Общей проблемой создания оптимальной схемы регулирования горения для котлов, работающих на твердом топливе, является измерение расхода топлива. Неоднородность состава твердого топлива делает возможным изменение тепловыделения при постоянной подаче топлива. Поэтому для котлоагрегатов, работающих на твердом топливе, в схемах регулирования процесса горения целесообразно использовать сигнал, связанный с тепловыделением в топке. Таким сигналом является сигнал по «теплу» - тепловой нагрузке.

Сигнал по тепловой нагрузке предложен З.Я. Бейрахом и В.М. Добкинским в ЦКТИ (г. Ленинград, 1953г). Тепловой нагрузкой котла называют расход пара, который был бы получен, если бы воспринятое поверхностями нагрева котельного агрегата тепло было израсходовано на парообразование, а не аккумулировалось частично водой, паром и металлом парообразующей части котла. Вследствие тепловой и материальной аккумуляции давление пара в какой-либо точке пароводяного тракта изменяется не мгновенно, а со скоростью, определяемой соотношением

$$A \frac{dp}{dt} = Q - D_n(i'' - i_{нв}) \quad (12-1)$$

где P – давление пара, Q – количество тепла, воспринятого поверхностями нагрева котла, D_n – расход пара, $D_n(i'' - i_{нв})$ – теплосодержание пара, i'' – энтальпия насыщенного пара, $i_{нв}$ – энтальпия питательной воды, A – размерный коэффициент, характеризующий аккумулирующую способность пара, воды, металла поверхностей нагрева.

Разделив все члены уравнения (12.1) на $(i'' - i_{нв})$ получим

$$\frac{Q}{i'' - i_{нв}} = D_n + \frac{A}{i'' - i_{нв}} \cdot \frac{dp}{dt} \quad (12-2)$$

Обозначим $D_q = \frac{Q}{i'' - i_{нв}}$, $c = \frac{A}{i'' - i_{нв}}$ и запишем уравнение (12.2) в виде

$$D_q = D_n + c \cdot \frac{dp}{dt} \quad (12-3)$$

Здесь D_q – тепловая нагрузка, характеризующая тепловыделение испарительных поверхностей котла в единицу времени, выраженную в единицах расхода пара. C – постоянная, характеризующая массовую аккумулирующую способность пароводяной смеси и металла испарительной части котла.

Экономичность топочного процесса в переходных режимах зависит от согласованности в изменениях подачи топлива и воздуха, поэтому определяется не только схемой регулирования расхода топлива, но и схемой регулирования подачи воздуха.

Предпочтение в АСР процессов горения на котлах получила комбинация регулятора топлива, действующего по теплу, с регулятором воздуха, выполненным по схеме «заданная нагрузка-воздух» (рис. 12.1,г).

Разработка и внедрение в АСР котла быстродействующего газоанализатора, непрерывно измеряющего содержание O_2 в дымовых газах, привела к созданию схем регулирования, основанных на непосредственном контроле экономичности топочного процесса. В этом случае регулятор воздуха работает от сигнала по содержанию O_2 в дымовых газах, а кроме того, воспринимает сигнал динамической связи, исчезающий в статике, от регулятора топлива для улучшения качества переходных процессов.

Регулирование подачи топлива на мощных котлах, работающих на пылевидном топливе, осуществляется с помощью пылепитателей. Способ регулирования скорости электродвигателей пылепитателей основан на одновременном изменении тока возбуждения электродвигателей постоянного тока при помощи специального устройства – плоского контролера.

Станция группового регулирования скорости электродвигателей питателей пыли предназначена для группового автоматического или ручного дистанционного регулирования скорости электродвигателей постоянного тока питателей угольной пыли или сырого угля.

Современная система регулирования электродвигателей пылепитателей дает возможность управлять одновременно до 48 пылепитателями и осуществлять бесступенчатое изменение скорости приводных электродвигателей в пределах от 300 до 1500 об/мин.

12.3 Регулирование процесса горения на котлах с шахтно-мельничными топками.

Особенности котельного агрегата с шахтно-мельничными топками как объекта регулирования:

- а) изменение выноса пыли из мельниц в топку после изменения подачи топлива происходит со значительным запаздыванием;
- б) изменение воздушного режима для первичного воздуха оказывает интенсивное, хотя и временное, влияние на вынос топлива;
- в) наряду с приведением общего воздуха в соответствие с тепловой нагрузкой необходимо для этих котлов обеспечить оптимальное соотношение между первичным и общим воздухом.

Регуляторы первичного воздуха устанавливаются по одному на каждую мельницу. Каждый из регуляторов первичного воздуха измеряет расход первичного воздуха на свою мельницу и поддерживает его с помощью регулировочных органов (поворотных заслонок) в соответствии с заданием.

Для котлов с шахтно-мельничными топками успешно зарекомендовала себя схема регулирования процесса горения, организованная по принципу «воздух-топливо» (рис. 12.2), в которой использован сигнал по средней мощности моторов шахтных мельниц, посылаемый на регулятор топлива. Такой сигнал, быстро реагирующий на изменения в подаче топлива, обеспечивает высокое быстродействие регулятора топлива без участия регуляторов первичного воздуха. Это позволяет выполнить регуляторы первичного воздуха независимыми от регулятора топлива и возложить на них функции поддержания заданного соотношения между расходами общего и первичного воздуха.

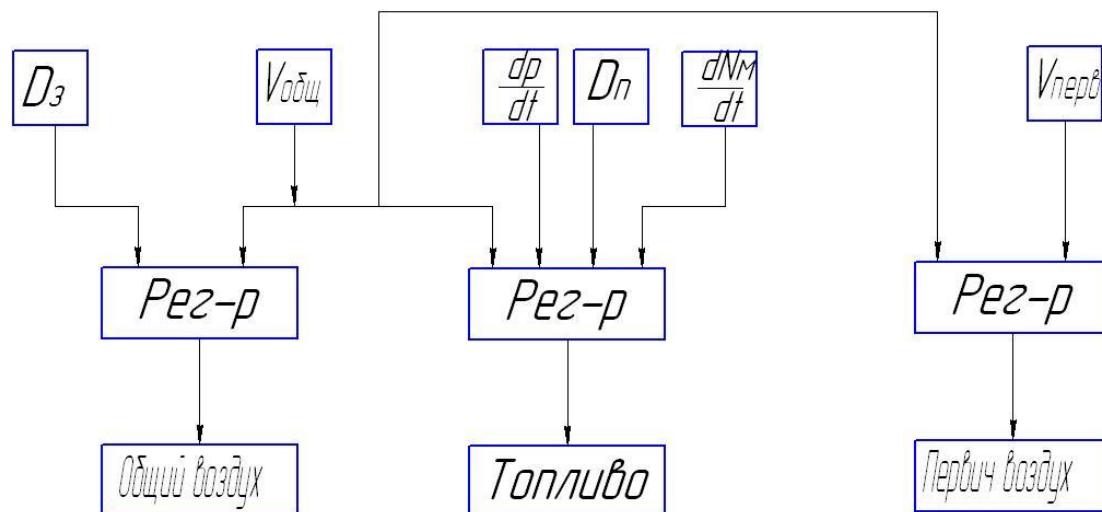


Рис. 12.2 Структурная схема регулирования процесса горения.

$V_{общ}$ – расход общего воздуха, $V_{перв}$ – расход первичного воздуха, $\frac{dNm}{dt}$ – скорость изменения мощности моторов мельниц.

Схема регулятора тяги существенно не изменилась. Импульс динамической связи от регулятора общего воздуха обеспечивает одновременность в изменениях воздуха и тяги, повышая точность поддержания разрежения при переменной нагрузке котла.

12.4 Регулирование процесса горения на котлах, работающих на жидком и газообразном топливе.

Для котлов, сжигающих жидкое и газообразное топливо, регулирование процесса горения организуется по принципу «топливо-воздух» (рис. 12.3).

Регулятор нагрузки (давления) (10) воздействуя на регулировочный орган подачи топлива (28) устанавливает соответствующий режиму расход топлива.

Регулятор экономичности (регулятор воздуха) (25) сравнивает расход топлива и воздуха и, воздействуя на поворотные направляющие аппараты или дроссельные заслонки дутьевых вентиляторов (24), приводит расход воздуха в соответствие с подачей топлива.

Для оптимизации процесса горения при режимах, отличных от номинальных, регулятор экономичности получает дополнительный импульс по количеству свободного кислорода O_2 в уходящих из котла дымовых газах.

Заданное разрежение в верхней части топки (для котлоагрегатов, работающих без наддува) поддерживается регулятором разрежения (22), воздействующих на поворотные направляющие аппараты или дроссельные заслонки дымососов (23). Для улучшения качества процесса регулирования к регулятору разрежения (22) подводится исчезающий в статике импульс от регулятора экономичности (25) через устройство динамической связи.

Регулятор разрежения, получая опережающий сигнал от регулятора экономичности, через устройство динамической связи переводит дымососы на новый режим работы до того, как изменится разрежение в топке. Этим обеспечивается более точное поддержание заданного разрежения.

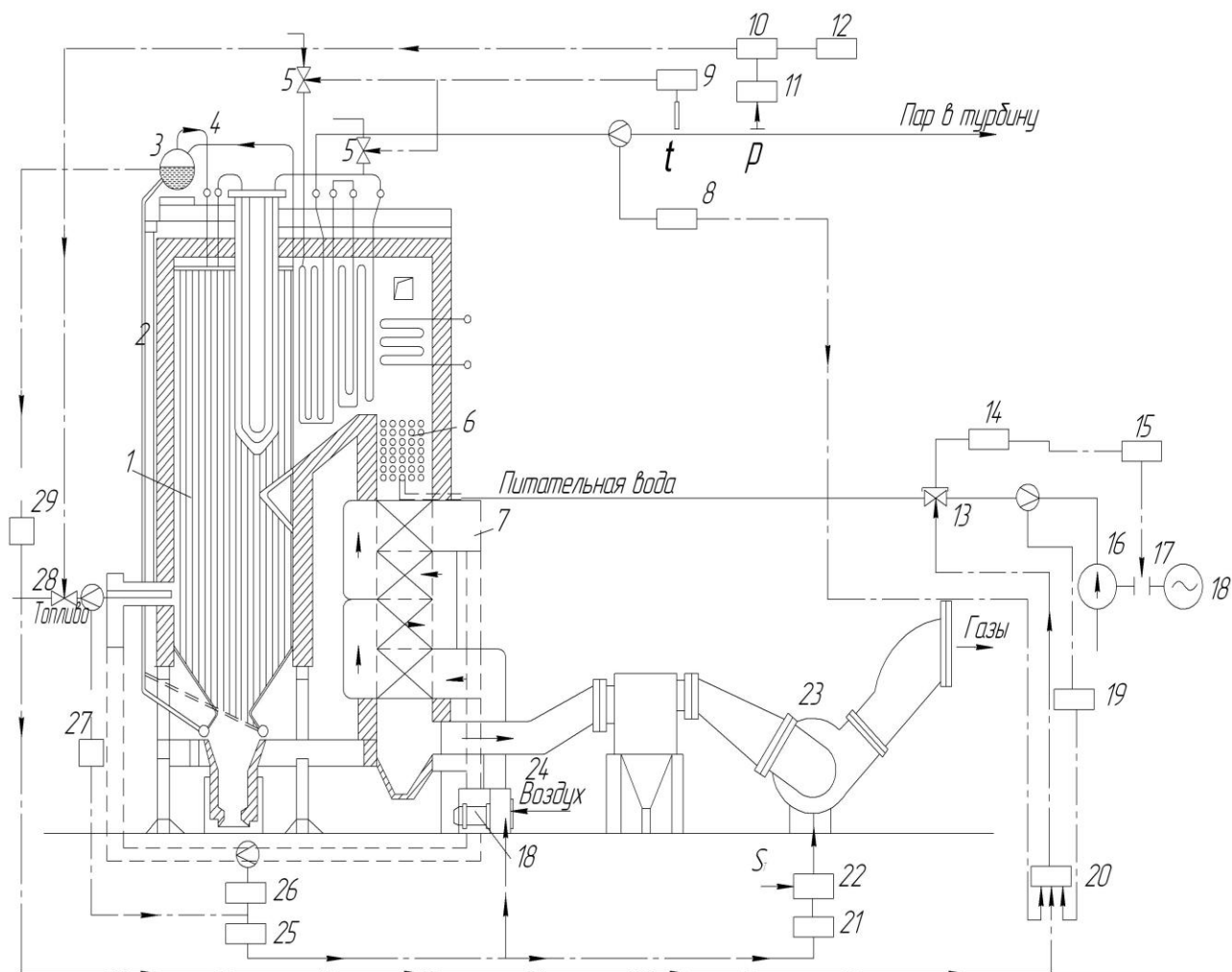


Рис. 12.3 Принципиальная схема регулирования барабанного котла.

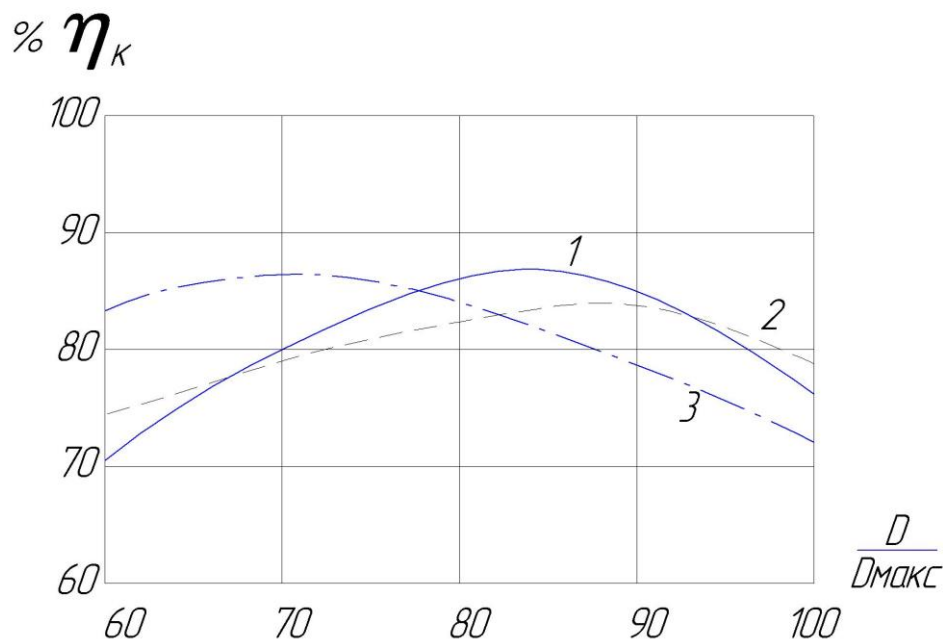
1-экраны поверхности топки, 2-опускные экраны, 3-барабан, 4-пароперегреватель, 5-впрыск воды, 6-экономайзер, 7-воздухоподогреватель, 8-датчик расхода пара, 9-регулятор температуры, 10-регулятор давления, 11-датчик давления, 12-задатчик, 13-питательный клапан, 14-дифференциальный манометр, 15-регулятор производительности, 16-питательный насос, 17-гидромуфта, 18-электродвигатель, 19-датчик расхода питательной воды, 20-регулятор питания, 21-устройство динамической связи, 22-регулятор разрежения, 23-дымосос, 24-дутьевой вентилятор, 25-регулятор экономичности процесса горения, 26-датчик расхода воздуха, 27-датчик расхода топлива, 28-регулирующий орган подачи топлива, 29-датчик уровня в барабане.

12.5 Управление котлами при параллельной работе на общую паровую магистраль.

При работе котлов ТЭС на общий паропровод некоторые из них могут быть оставлены для работы в базовой нагрузке при постоянной подаче топлива, а другие составляют группу, участвующую в регулировании нагрузки электростанции. Регулятор давления пара, поддерживая давление в общей паровой магистрали, должен одновременно управлять нагрузкой всех котлов, составляющих эту группу, выполняя функцию главного регулятора.

Известно, что при постоянной расчетной нагрузке котел работает более экономично, чем при нерасчетном режиме. Из этих соображений желательно было бы большую часть котлов оставить в базовом режиме. Однако, чем больше котлов не участвует в регулировании нагрузки, тем больше становятся колебания паропроизводительности на остальных регулирующих котлах и тем меньше экономические показатели их работы.

Поэтому выбор числа и типа регулирующих котлов, а также распределение между ними нагрузки производится с учетом их режимных характеристик, показывающих изменение КПД в зависимости от паропроизводительности в диапазоне регулирования (рис. 12.4). В качестве регулирующих стремятся использовать котлы у которых КПД малоизменяется с изменением нагрузки.



12.4 Режимные характеристики котлов.

На основании приводимых характеристик трех котлов следует, что целесообразно котел №1 перевести в базовый режим при нагрузке 75-90%, а котлы №2 и №3 использовать в качестве регулирующих, причем установить котлу №2 нагрузку выше чем котлу №3.

Таким образом, регулирование давления пара в общей паровой магистрали при параллельной работе котлов должно обеспечить одновременное управление нагрузкой нескольких котлов и дать возможность изменять участие каждого из них в покрытии общей электрической нагрузки станции.

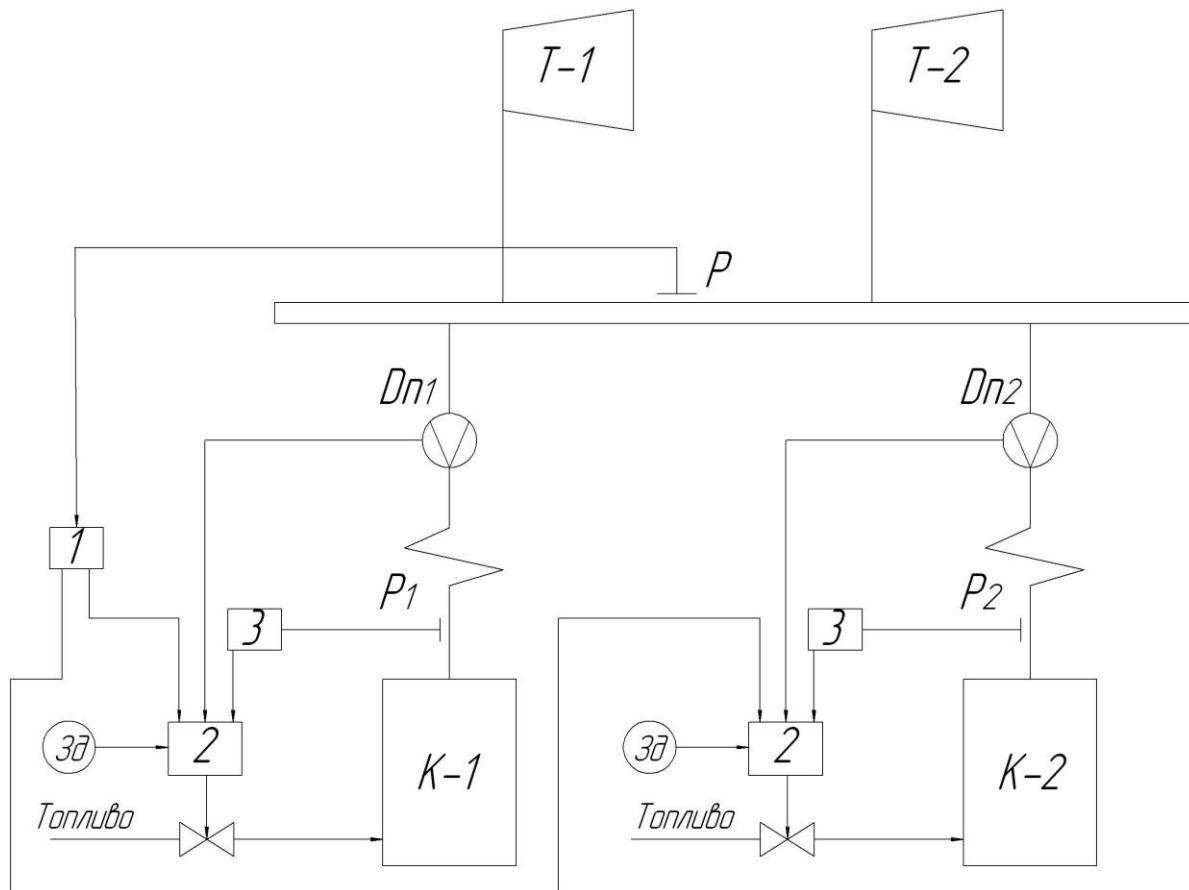
Рассмотрим одну из типовых схем управления котлами ТЭС при их параллельной работе на общую паровую магистраль (Рис. 12.5).

Для стабилизации режима отдельных котлов не только при внешних, но и при внутренних возмущениях применяется схема, предусматривающая установку регулятора тепловой нагрузки на каждом из котлов, работающих на общий паропровод и общего для них корректирующего регулятора давления.

Регулятор давления (1) не управляет подачей топлива, а лишь корректирует задание регуляторам тепловой нагрузки (2) всех регулирующих котлов. Каждый из этих регуляторов, управляя подачей топлива, поддерживает тепловую нагрузку своего котла в соответствии с заданием корректирующего регулятора. Регуляторы (2) имеют задатчики, позволяющие устанавливать желательное распределение нагрузок между котлами.

Тепловая нагрузка измеряется по сумме расхода пара и скорости изменения давления пара в барабане котла, сигнал которой поступает от дифференцирующего устройства (3).

При изменении нагрузки турбин корректирующий регулятор (1) меняет задание всем регуляторам тепловой нагрузки, которые в свою очередь, уменьшая или увеличивая подачу топлива, изменяют нагрузку своих котлов в соответствии с новым значением командного задания.



12.5 Принципиальная схема каскадного регулирования давления пара с главным корректирующим регулятором.

1 – главный (корректирующий) регулятор, 2 – регулятор тепловой нагрузки, 3 – дифференцирующее устройство, Зд – задатчик.

При внутренних возмущениях, например, при уменьшении подачи топлива на один из котлов и снижении его паропроизводительности регулятор тепловой нагрузки (2) этого котла увеличит подачу топлива только в свой котел и восстановит его нагрузку вновь до значения, заданного корректирующим регулятором давления.

При внутренних возмущениях тепловая нагрузка меняется быстрее, чем давление пара. Поэтому регулятор тепловой нагрузки (2) воспримет нарушения и восстановит подачу топлива прежде, чем это нарушение успеет существенно сказаться на давлении пара в общей паровой магистрали. Таким образом, внутреннее возмущение на одном из котлов будет устранено при данной схеме регулирования до того, как оно успеет оказать значительное влияние на режимы остальных, параллельно работающих котлов.

Эта схема позволяет перевести часть котлов в базовый режим работы. При этом регулятор тепловой нагрузки останется в работе, но для него задатчиком устанавливается постоянное задание, не зависящее от работы главного (корректирующего) регулятора давления. В этом случае постоянство нагрузки этого котла автоматически поддерживается его регулятором тепловой нагрузки.

12.6 Регулирование питания барабанного котельного агрегата водой.

Автоматизация питания барабанных котлоагрегатов предусматривает автоматическое управление питанием водой как при условиях нормального протекания эксплуатационных режимов работы котла, так и при режимах пуска и останова котельного агрегата.

В свою очередь нормальные эксплуатационные режимы работы могут протекать при постоянном и переменном (скользящем) давлении свежего пара.

Показателем соответствия материального баланса между паром и водой – расхода свежего пара и расхода питательной воды служит уровень в барабане котла. Отклонение уровня воды в барабане от среднего значения характеризует наличие небаланса между притоком питательной воды и расходом пара. Оно (отклонение) происходит также вследствие изменения паросодержания пара в пароводяной смеси подъемных труб за счет колебаний давления пара в барабане котла или изменений тепловосприятости испарительных поверхностей нагрева.

Так, при увеличении расхода пара в первый момент после возмущения уровень воды в барабане возрастает в результате резкого уменьшения давления пара, что в свою очередь приводит к увеличению паросодержания в подъемных трубах циркуляционного контура и росту уровня. Это явление называется набуханием уровня.

При изменении нагрузки котла и, как следствие, изменении его паропроизводительности средний уровень воды должен поддерживаться постоянным.

Максимально допустимые отклонения уровня воды в барабане составляют ± 100 мм от среднего значения, установленного заводом-изготовителем. При этом средний уровень не обязательно должен совпадать с геометрической осью барабана. Снижение уровня ниже видимой части водомерного стекла, установленного на барабане котельного агрегата, считается «упуском» воды, а превышение его верхней видимой части – «перепиткой». Расстояние между этими критическими отметками составляет 400 мм.

Снижение уровня ниже места присоединения опускных труб циркуляционного контура может привести к нарушению питания и охлаждению водой подъемных труб, нарушению их прочности в местах стыковки с корпусом барабана, а в наиболее тяжелых случаях и пережогу.

Чрезмерное повышение уровня может привести к ухудшению действия внутрибарабанных сепарационных устройств, заносу солями пароперегревателя, а также забросу частиц воды в турбину, что может явиться причиной тяжелых механических повреждений лопаток ее ротора.

Снабжение барабана водой осуществляется по одной, реже двум ниткам трубопроводов питательной воды, одна из которых служит резервной.

Схема автоматического регулирования питания котельного агрегата. В АСР питания котла водой реализован принцип комбинированного регулирования по возмущению – при изменении расхода пара или питательной воды и отклонению – при изменении уровня воды в барабане котла.

Регулятор питания должен обеспечить постоянство среднего уровня воды независимо от нагрузки котла и возмущающих воздействий (Рис. 12.7).

В АСР питания используют для этих целей трехимпульсный регулятор питания. Сигналы по возмущению: расход свежего пара D_n , расход питательной воды $D_{пв}$. Сигнал по отклонению: уровень в барабане котельного агрегата H_6 . Сигнал по расходу питательной воды используется как выключающий для снятия в статике сигнала по расходу пара.

Регулятор питания перемещает регулировочный орган на линии питательной воды при появлении сигнала небаланса между расходами питательной воды и перегретого пара. Помимо этого он воздействует на положение клапана при отклонении уровня воды в барабане котельного агрегата от заданного значения. Использование сигналов D_n и $D_{пв}$ обеспечивают быстрое действие АСР питания, сигнал H_6 – заданную точность поддержания уровня в барабане.

В схеме измерительного блока регулятора питания датчики D_n , $D_{пв}$ и H_6 включены таким образом, что при понижении уровня воды в барабане котлоагрегата, увеличении расхода пара, уменьшении расхода питательной воды, они действуют в одном направлении –

в сторону открытия питательного клапана, а при повышении уровня, уменьшении расхода пара и увеличении расхода питательной воды в сторону закрытия питательного клапана.

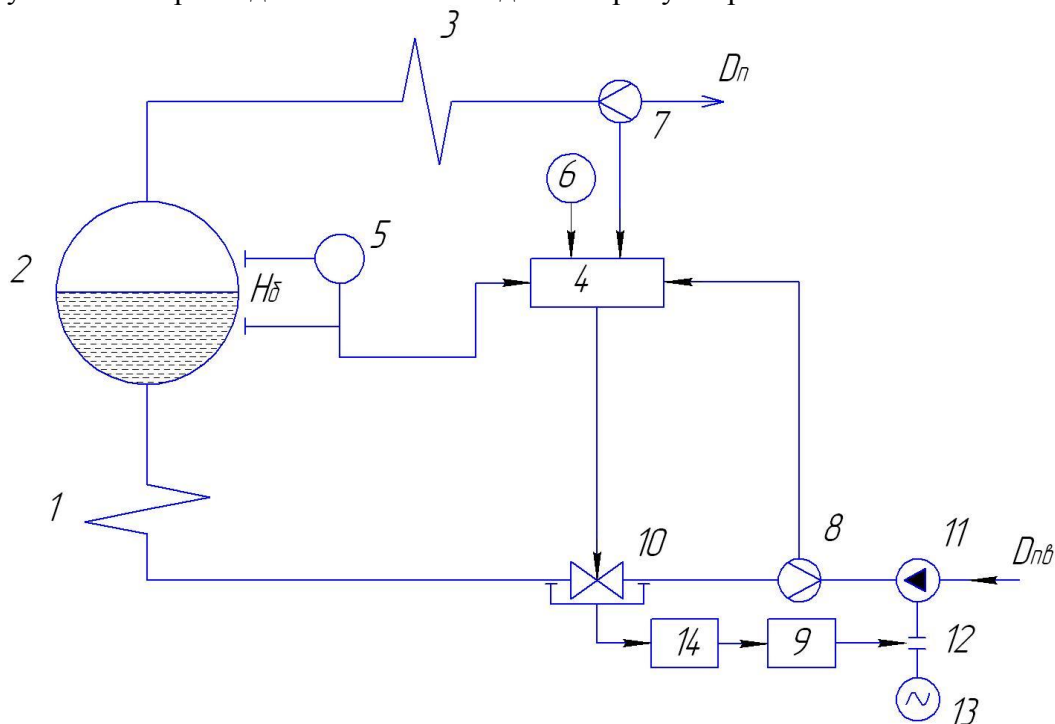


Рис. 12.7 Принципиальная схема регулирования питания барабана котла.

1-экономайзер, 2-барабан котла, 3-пароперегреватель, 4-регулятор питания, 5-датчик уровня, 6-задатчик, 7-датчик расхода пара, 8-датчик расхода питательной воды, 9-регулятор производительности, 10-питательный клапан, 11-питательный насос, 12-гидромуфта, 13-электродвигатель, 14 – дифференциальный манометр.

В качестве регулировочных органов питания используются шибберные клапаны и клапаны золотникового типа.

При полном сбросе нагрузки на котле вследствие повышения давления пара в барабане возможно срабатывание предохранительных клапанов. Количество пара, проходящее через эти клапаны не учитывается датчиком расхода пара. Регулятор питания при этом становится двухимпульсным и будет поддерживать заниженный уровень в барабане в соответствии с неравномерностью регулятора по уровню. Поэтому необходимо выбирать минимально возможную величину неравномерности по уровню, обеспечивающую приемлемые динамические качества АСР питания.

При скользящем (переменном) начальном давлении пара перед турбиной для котла, работающего с ней в блоке, по всему пароводяному тракту отсутствуют дросселирование рабочего тела, а уменьшение давления производится снижением скорости вращения питательного насоса, при этом сокращается мощность, затрачиваемая на его привод. Изменение числа оборотов питательного насоса, (11) связанного гидромуфтой (12) с электродвигателем (13), достигается воздействием регулятора производительности (9) по сигналу перепада давления на питательном клапане (10) от дифманометра (14).

12.7 Автоматическое регулирование температуры перегрева пара.

Автоматическое регулирование перегрева пара должно обеспечить поддержание температуры перегретого пара в заданных пределах вне зависимости от нагрузки котельного агрегата. Для обеспечения надежной и экономичной работы котла и турбины отклонение температуры перегрева от номинального значения на котлах среднего и высокого давлений

не должно превышать 10°C. При наличии автоматического регулирования эти отклонения могут быть снижены до температуры 5°C.

Необходимость достаточно точного поддержания температуры перегрева вызвана следующими причинами:

- металл труб котельного агрегата находится в особенно тяжелых условиях работы;
- повышение температуры выше допустимых значений может привести к аварии вследствие появления ползучести металла, повышенных тепловых расширений и ряда других причин;
- надежность работы турбины при повышении температуры пара ограничивается предельными тепловыми расширениями ее элементов;
- понижение температуры перегретого пара снижает экономичность работы котла и ТЭС в целом, кроме того, значительное понижение температуры пара перед турбоагрегатом приводит к недопустимому повышению влажности в последних ступенях турбины и эрозии лопаток, следствием чего оказывается увеличение удельного расхода пара, а в некоторых случаях и аварийный останов турбоагрегата.

Из условий прочности металла труб пароперегревателя, паропровода и турбины важно не только обеспечить поддержание температуры в заданных пределах, но и не допустить резких ее изменений.

Характеристики котла как объекта регулирования температуры перегрева пара.

Для барабанного парового котла температура перегрева пара в установившемся режиме зависит от распределения общего восприятия тепла между испарительными поверхностями нагрева и пароперегревателями. Распределение это меняется как с изменением нагрузки котла, так и при прочих различных отклонениях эксплуатационного режима - шлакования топки, загрязнения поверхностей нагрева, изменения температуры питательной воды, избытка воздуха, угрубления тонины помола пыли, нарушения работы сепарационных устройств.

Зависимость отклонения температуры перегрева пара от каждого из этих факторов в установившихся режимах характеризует статические свойства котельного агрегата, а законы изменения температуры во времени при различных возмущениях – динамические свойства.

Статические характеристики котла. Величина и направление отклонения температуры перегрева пара с изменением нагрузки котла определяется конструкцией пароперегревателя и местом расположения его по газовому тракту.

Для чисто конвективного пароперегревателя температура перегрева резко возрастает с увеличением нагрузки (кривая 1) (Рис. 12.8). Это объясняется тем, что при увеличении нагрузки возрастают объем, скорость и температура продуктов сгорания в газоходах котла и, следовательно, доля тепла, воспринятого конвективными поверхностями нагрева. Тепловосприятие радиационных поверхностей нагрева растет не пропорционально нагрузке (кривая 2), с повышением нагрузки оно изменяется незначительно и при увеличении расхода пара температура его снижается.

Пароперегреватель современного парового котла, расположенный непосредственно за фестоном, воспринимает тепло за счет конвекции и частично за счет радиации. Поэтому рост температуры перегрева пара с увеличением нагрузки значительно сокращается по сравнению с характеристикой чисто конвективного пароперегревателя и не превышает 20-30°C при полном диапазоне изменений нагрузок (кривая 3), т.е. характеристика пароперегревателя способствует поддержанию постоянной температуры, но обеспечить ее не может.

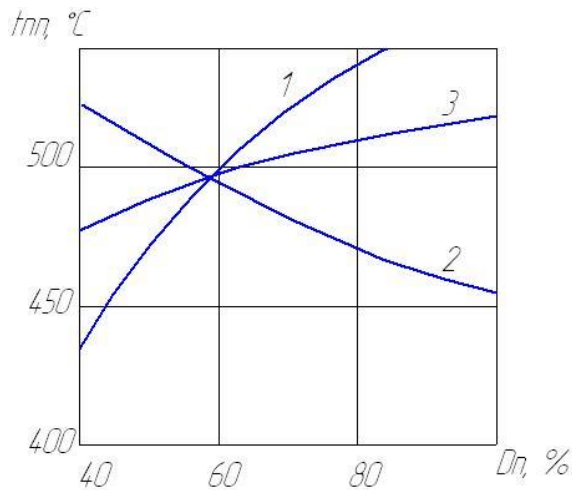


Рис. 12.8 Статические характеристики пароперегревателя.

Динамические свойства пароперегревателя. Динамические свойства пароперегревателя определяются размерами его поверхностей нагрева, режимами работы и видом возмущения на пароперегреватель.

Нормальными для АСР температуры перегрева пара являются режимы изменения нагрузок от 60 до 100 % для пылеугольных котлов и 30-100 % для газомазутных котлоагрегатов.

Возможные нарушения эксплуатационных режимов, вызывающие отклонение температуры перегрева, сводятся к трем основным типам возмущения на пароперегреватель:

1. изменение теплосодержания пара на входе в пароперегреватель за счет изменения его температуры или влажности;
2. изменение тепловосприятости пароперегревателя за счет изменения температуры или количества греющих газов;
3. изменение расхода пара через пароперегреватель.

Особенностью динамических характеристик пароперегревателя при любых возмущениях является наличие запаздывания изменения температуры пара при выходе из пароперегревателя после поступления возмущающего воздействия (рис 12.9).

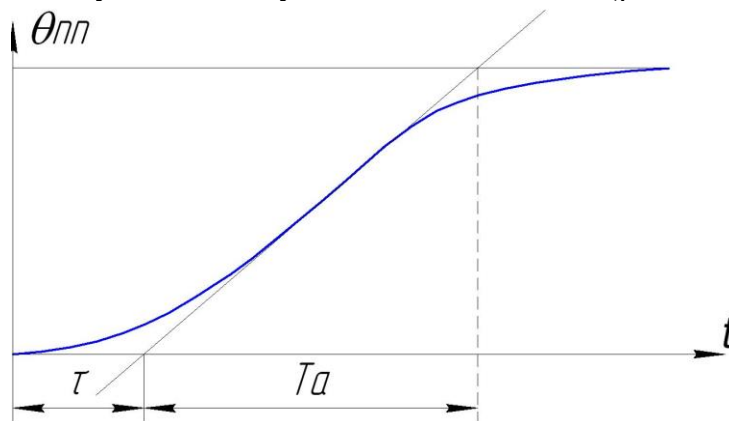


Рис. 12.9 Динамическая характеристика пароперегревателя.

Наиболее значительно запаздывание при возмущении теплосодержанием пара на входе в пароперегреватель. В зависимости от типа котла емкостное запаздывание может колебаться от 27 до 85 с. Запаздывание объясняется тем, что при снижении температуры пара первые порции охлажденного пара, поступающего в пароперегреватель, нагреваются не только за счет переданного от газов тепла, но и частично за счет тепла,

аккумулированного металлом труб пароперегревателя. Время запаздывания τ и время разгона T_a тем больше, чем больше толщина стенки и длина труб пароперегревателя.

При других видах возмущений время запаздывания на порядок меньше и динамические характеристики пароперегревателя близки по своему виду и характеру изменения температуры перегрева пара.

Автоматическая система регулирования температуры перегрева пара предназначена для поддержания заданного температурного режима в паровом тракте котла. С этой целью весь паровой тракт котельного агрегата разбивается на ряд участков. На выходе каждого из них должно поддерживаться заданное значение температуры, определенное заводом-изготовителем или наладочной организацией.

АСР температуры перегрева пара должна гарантировать в регулировочном диапазоне работы котельного агрегата:

- устойчивую работу автоматических регуляторов (отсутствие автоколебаний);
- ограниченную частоту включения регуляторов, которая при постоянной нагрузке не должна превышать шесть включений в минуту;
- поддержание заданного значения температуры перегрева пара при выходе из котла при номинальной нагрузке с максимальным отклонением менее 1 % номинального значения температуры;
- максимальное отклонение температуры при переходных режимах - 8°C – для температуры свежего пара, 10°C – для температуры пара промежуточного перегрева.

Методы регулирования температуры перегрева пара. Существуют три метода регулирования температуры перегрева пара: смешивания, поверхностного охлаждения и изменения теплового воздействия на пароперегреватель. При регулировании температуры перегрева пара смешиванием в пар впрыскивается питательная вода или конденсат (турбины или собственный), либо вводится пар с меньшей энтальпией.

Принцип действия впрыскивающего пароохладителя основан на изменении энтальпии частично перегретого пара за счет теплоты, отбираемой от него на испарение охладителя, впрыскиваемого в паровой тракт пароперегревателя. Регулирование температуры пара при выходе из пароперегревателя осуществляется изменением количества впрыскиваемого охладителя. За счет этого изменяется температура пара при выходе из пароперегревателя.

Впрыскивающие пароохладители устанавливаются в одном из промежуточных сечений пароперегревателя. Стремление получить хорошее качество регулирования температуры пара и обеспечить надежность металла поверхностей нагрева пароперегревателя привело к применению нескольких впрысков. Чаще всего ограничиваются двумя, так чтобы приращение энтальпии пара в пакете пароперегревателя за впрыском составляло 100-200 кДж/кг. Последний по ходу пара впрыск является основным, регулирующим температуру первичного пара.

На рис. 12.10 приведены схемы регулирования температуры перегрева пара методом смешивания путем впрыска питательной воды (а), забираемой из питательной магистрали, собственного конденсата котла, получаемого из насыщенного пара (б) и конденсата турбины (в), подаваемого на впрыск плунжерным насосом.

Схема впрыска (рис. 12.10,а) применяется, когда солесодержание питательной воды не превышает нормы, допустимой по условиям работы котла. Получение собственного конденсата на котлах обеспечивается за счет перепада давления между барабаном котла и местами впрыска (рис. 12.10, б). Часть насыщенного пара из барабана поступает в конденсатор (7), где пар конденсируется за счет отдачи тепла питательной воде после экономайзера. Конденсат стекает в конденсатосборник (8) и поступает на впрыск к регулирующим клапанам (6).

Собственный конденсат содержит меньше солей, чем питательная вода, давление в линии конденсата не зависит от изменения давления на напоре питательного насоса.

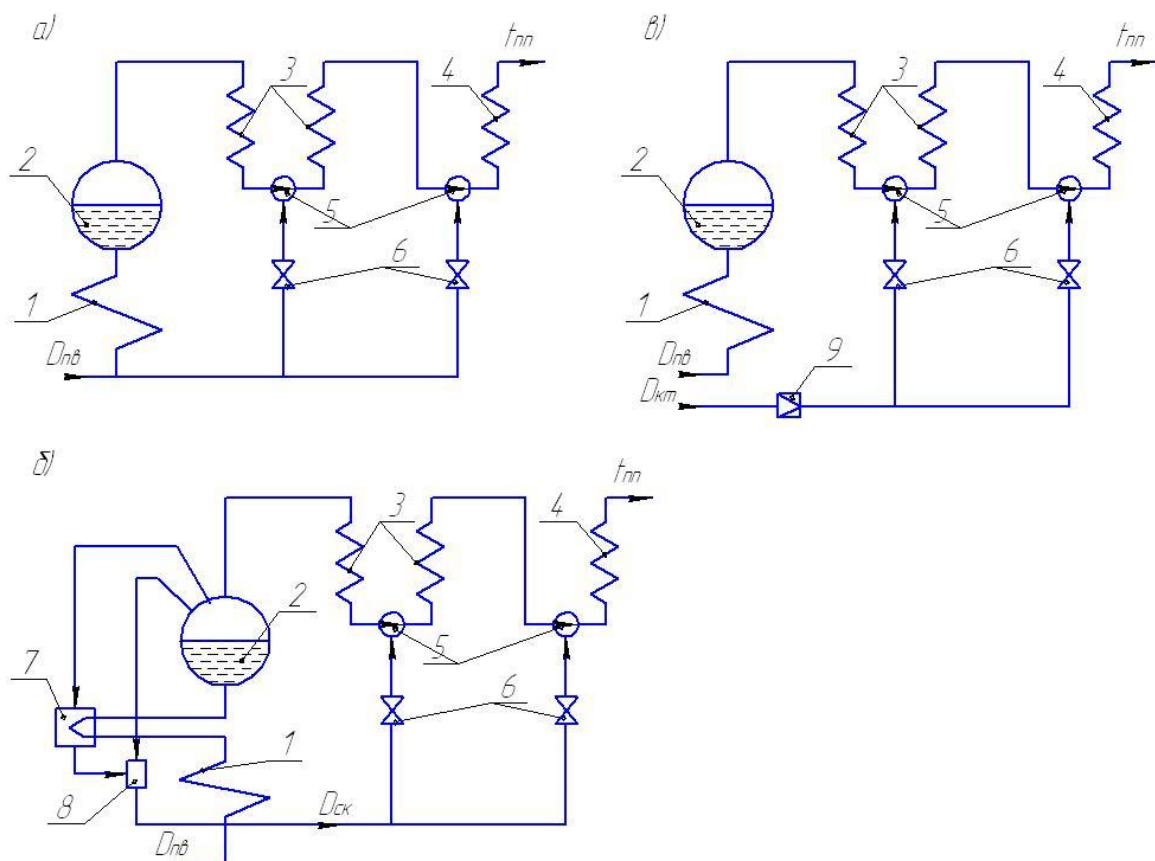


Рис. 12.10 Схемы впрыскивающего пароохлаждения.

1- экономайзер, 2-барaban котла, 3-первая (радиационная) ступень пароперегревателя, 4-вторая (конвективная) ступень пароперегревателя, 5-впрыскивающие пароохладители, 6-регулирующие клапаны впрыска, 7- конденсатор, 8-конденсатосборник, 9-плунжерный насос, $D_{нв}$ - расход питательной воды, $D_{ск}$ - расход собственного конденсата, $D_{кт}$ - расход конденсата турбины, $t_{пп}$ – температура перегретого пара.

Благоприятным является фактор саморегулирования температуры при изменении нагрузки котла, в лучших условиях работают регулировочные клапаны, но недостатком этого метода является необходимость создания специальной установки для приготовления собственного конденсата и уменьшение располагаемого перепада давлений на клапане впрыска с уменьшением нагрузки котла. При наличии установок для получения конденсата резервным является впрыск питательной водой.

В целом впрыскивающие пароохладители находят наибольшее применение, т.к. они обладают хорошими динамическими свойствами - практически отсутствием запаздывания и малой инерционностью в регулировании температуры.

Схема впрыскивающего пароохладителя (рис.12.10,в) применяется при отсутствии на котлах установки для приготовления собственного конденсата, а также когда использование для впрыска питательной воды недопустимо. Конденсат для впрыска подается к пароохладителям плунжерным насосом (9).

Регулирование температуры перегрева пара путем смешивания пара с различной энтальпией (байпасирование) применяется в основном при промежуточном перегреве пара.

При поверхностном охлаждении (рис. 12.11,а) регулирование температуры перегрева пара осуществляется количеством воды, подаваемой в поверхностный пароохладитель. Этот метод применяется для регулирования температуры пара в барабанных котлах среднего и высокого давления в тех случаях, когда нельзя использовать для впрыска питательную воду из-за ее повышенного содержания, а установки для приготовления собственного конденсата отсутствуют.

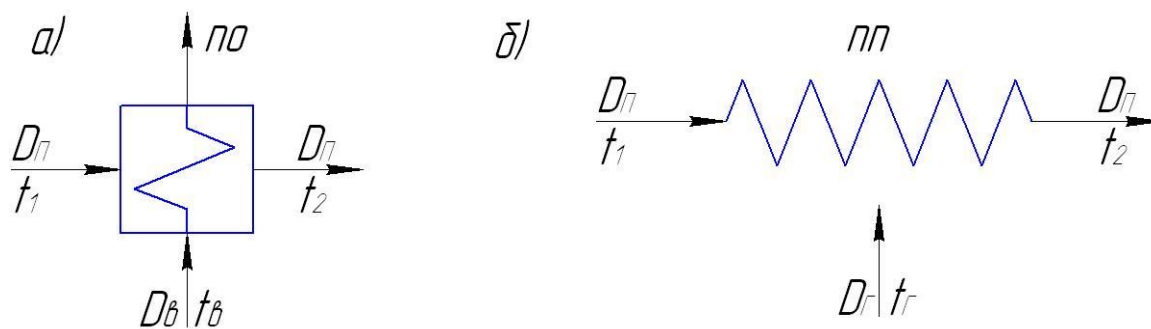


Рис. 12.11 Схемы регулирования температуры перегрева пара.

а) поверхностным охладителем, б) изменением теплового воздействия. ПО – пароохладитель, ПП – пароперегреватель, $D_{п}$ – расход пара, $D_{в}$ – расход воды, $D_{г}$ – количество газов, t_1, t_2 – температура пара на входе и выходе, $t_{в}$ – температура воды, $t_{г}$ – температура газов.

В сравнении с впрыскивающими поверхностные пароохладители имеют большую инерционность и конструктивно сложнее. В паротурбинных энергоблоках эта схема не применяется.

При газовом регулировании температуры перегрева пара (рис. 12.11,б) изменение теплового восприятия поверхностями нагрева пароперегревателя (ПП) выполняется либо изменением расхода дымовых газов, омывающих пароперегреватель, либо рециркуляцией дымовых газов, или перераспределением дымовых газов по газоходам.

Первый вариант реализуется поворотом горелок или переключением горелок при многоярусном их расположении. При втором варианте часть дымовых газов из конвективной шахты котла специальным дымососом возвращается в топку.

В третьем варианте схема регулирования температуры реализуется с помощью регулирующих заслонок для дымовых газов, проходящих через газоход, в котором расположен пароперегреватель.

Недостатками схем газового регулирования является большая инерционность, кроме того, регулирующие заслонки работают в тяжелых температурных условиях. В целом газовое регулирование температуры перегрева пара реализуется в сочетании с впрыском.

Схема автоматического регулирования температуры перегрева пара с применением впрыскивающих пароохладителей. Из всего разнообразия методов регулирования температуры перегрева пара наибольшее применение получил метод смешивания. Общепринятой служит схема АСР, в которой регулятор температуры перегрева пара получает основной сигнал по отклонению температуры пара при выходе из пароперегревателя и дополнительный – пропорциональный скорости изменения температуры пара в промежуточной точке непосредственно за впрыском (Рис. 12.12).

Пароперегреватель имеет два самостоятельных потока пара. В каждом из них установлен пароохладитель впрыскивающего типа. Из-за тепловых перекосов по ширине газохода котла температура пара в потоках пароперегревателя может изменяться неодинаково, поэтому работой каждого пароохладителя управляет свой регулятор.

Сигналы по изменению температуры за ступенями пароперегревателя θ_1 и θ_2 и скорости изменения температуры пара за впрыском Θ'_1 и Θ'_2 поступают к регулятору (7), далее на исполнительные механизмы (8). Клапаны впрыска (9), жестко связанные с исполнительными механизмами, изменяют расход охладителя.

Чтобы исключить влияние на работу АСР температуры перегрева пара колебаний тепловосприятие второй ступени пароперегревателя, на вход регулятора впрыска первой ступени подают сигнал «люфт» от регулятора впрыска второй ступени. Сигнал «люфт» поступает лишь в случае, когда регулирующий клапан впрыска второй ступени

пароперегревателя займет положение близкое к полному открытию, примерно 85 % полного хода. При этом подается сигнал на увеличение открытия клапана первого впрыска, что позволяет ввести второй впрыск в диапазон регулирования.

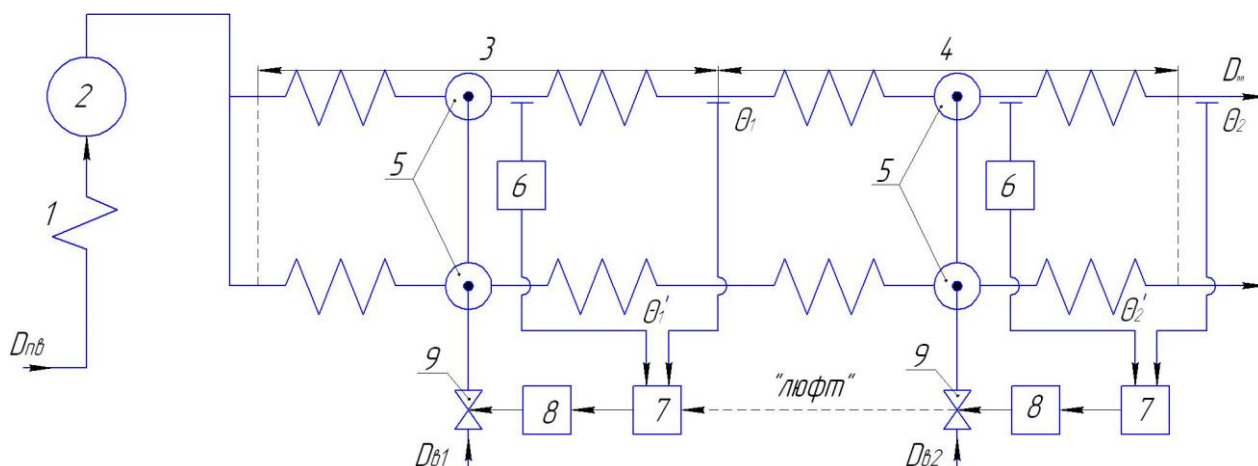


Рис. 12.12 Принципиальная схема автоматического регулирования температуры перегрева пара. 1 – экономайзер, 2 – барабан котла, 3 – первая (радиационная) ступень пароперегревателя, 4 – вторая (конвективная) ступень пароперегревателя, 5 – впрыскивающий пароохладитель, 6 – дифференциаторы, 7 – регуляторы, 8 – исполнительные механизмы, 9 – клапаны впрыска. D_{n6} – расход питательной воды, D_{n61} – расход перегретого пара, D_v – расход воды на впрыск, θ_1, θ_2 – температуры пара за первой и второй ступенью пароперегревателя, θ'_1, θ'_2 – скорость изменения температуры пара после первого и второго впрыска.

В элементный состав АСР температуры перегрева входят: датчики температуры (термопары), дифференциаторы, пропорционально-интегральные регуляторы, регулировочные клапаны – игольчатые, скальчатые, поворотные или шиберные. Последние выгодно отличаются от клапанов других типов отсутствием заедания, малым нерегулируемым пропуском, большими допустимыми перепадами давления (до 5 МПа).

Расход охладителя на впрыск составляет 5-6 % от расхода питательной воды на котел.

12.8 Регулирование температуры пара вторичного перегрева.

Стремление к повышению тепловой экономичности паротурбинных установок (ПТУ) привело в начале 50-х годов к широкому изменению промежуточного перегрева пара. Практически все турбинные агрегаты мощностью выше 100 МВт имеют промежуточный перегрев пара.

В ПТУ большой единичной мощности на сверхкритических параметрах пара в случае применения дорогостоящего топлива может быть целесообразен двукратный промперегрев пара.

Для промежуточных пароперегревателей впрыскивающие пароохладители обычно не применяются. Впрыск воды в промперегреватель приводит к образованию пара, не прошедшего цилиндр высокого давления турбоагрегата, что снижает экономичность всей ПТУ.

Для паротурбинных блоков (ПТБ) при работе с переменными нагрузками температура вторичного пара должна поддерживаться с высокой точностью в допустимых пределах.

Для ПТБ, работающих в базовом режиме, необходимость в глубоком регулировании температуры промперегрева не очевидна, что позволяет отказаться от специального регулирования температуры пара на выходе из промперегревателя.

Способы регулирования температуры пара вторичного перегрева. Для регулирования температуры пара вторичного перегрева используются паропаровые и газопаропаровые теплообменники. Способ регулирования основан на передаче части тепла от пара высокого давления к пару, поступающему на вторичный перегрев после цилиндра высокого давления турбины.

Паропаровые теплообменники (ППТО) представляют собой вынесенный за пределы газохода корпус, выполненный из трубы большого диаметра (300-400 мм), внутри которого помещено большое количество (10-20 шт.) труб малого диаметра (25-38 мм) объединенных трубными досками. Греющий пар высокого давления с температурой 450-520°C движется внутри трубок. Внутри трубы большого диаметра встречно проходит вторичный пар (с температурой 320-350°C), получая тепло от пара высокого давления (греющего).

Регулирование температуры вторичного перегрева пара производится путем изменения его расхода через ППТО с помощью трехходового клапана и обводного паропровода (рис. 12.13).

При сокращении расхода пара через байпас теплообмен между паровыми средами усиливается, и температура пара промперегрева за ППТО после смешения с байпасируемой частью повышается.

Температурный напор на «горячем» (на пару низкого давления) конце ППТО по технико-экономическим соображениям выбирается при всех режимах не менее 25°C. Расход регулируемого потока пара через теплообменник не должен быть ниже 20 % от полного.

Газопаропаровые теплообменники чаще выполняются в виде ширм, расположенных в газоходе котла. В этом случае пар более низкого давления (вторичный) наряду с получением регулируемой доли тепла от первичного пара воспринимает также тепло продуктов сгорания.

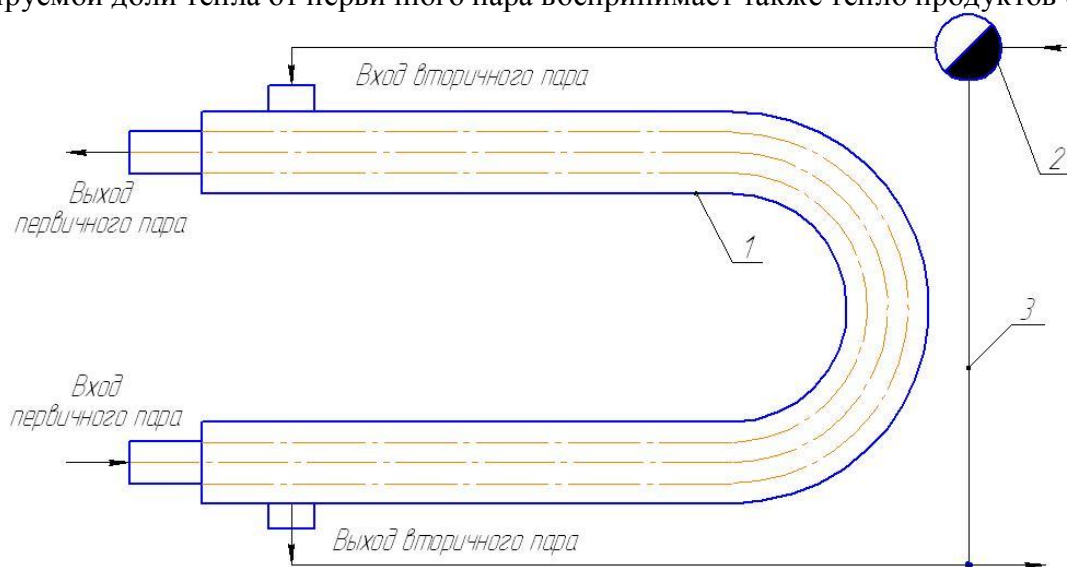


Рис. 12.13 Схема включения паропарового теплообменника.

1 – паропаровой теплообменник, 2 – трехходовой кран, 3 – обводной паропровод (байпас).

Поверхность теплообмена выполняется по принципу «труба в трубе». Пар высокого давления (первичный) протекает по внутренним трубкам, а пар низкого давления по кольцевому сечению между трубками.

В связи с расширением ширм ГППТО в зоне высоких температур газов необходимо надежное охлаждение наружных труб. Поэтому в таких конструкциях ширм предусмотрено регулирование путем переменного пропуска через ширмы только первичного (греющего) пара. Пар вторичного перегрева проходит через ширмы всегда полным расходом.

В обоих случаях (ППТО и ГППТО) в качестве резервного средства регулирования на случай чрезмерного повышения температуры вторичного перегрева предусмотрен в АСР аварийный впрыск.

Принципиальная схема АСР температуры вторичного перегрева представлена на рис. 12.14.

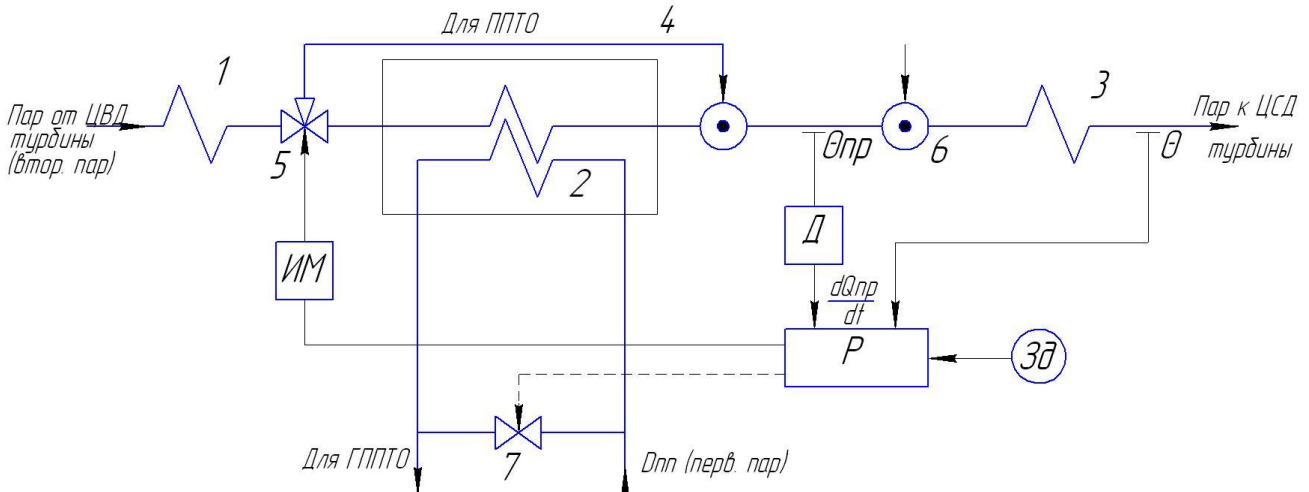


Рис. 12.14 Принципиальная схема регулирования температуры вторичного перегрева пара.

1,3 – ступени вторичного промперегрева, 2 – паровой или газопаровой теплообменник, 4 – байпасный паропровод, 5 – трехходовой регулирующий клапан, 6 – аварийный впрыскивающий пароохладитель, 7 – обводной клапан, Р - регулятор, ИМ – исполнительный механизм, Д – дифференциатор, Зд – задатчик.,

Схема реализуется как для варианта использования ППТО, так и для ГППТО. Регулятор температуры пара вторичного перегрева получает сигналы по температуре пара на выходе из пароперегревателя θ и скорости изменения температуры пара за байпасом $\frac{d\theta_{np}}{dt}$.

Вариант использования ГППТО менее инерционен, однако использование его не всегда обеспечивает достаточный диапазон регулирования температуры.

Регулирование температуры пароперегрева перепуском части пара вторичного перегрева в обвод конвективной поверхности пароперегревателя (байпасирование пара). Особенностью такого регулирования является изменение тепловосприятости промперегревателя при очень слабом влиянии на тракт первичного пара. В этом отношении регулирование температуры пара вторичного перегрева практически является автономным.

Принципиальная схема регулирования при использовании парового байпасирования (рис. 12.15).

Конструктивно «холодный пакет» (1-я ступень промперегрева) размещается в зоне сравнительно низких температур газов, а «горячий пакет» (2-я ступень промперегрева) выносится в зону высоких температур газов. Тепловосприятость промежуточного пароперегревателя регулируется трехходовым клапаном, перепускающим часть «холодного» пара, помимо 1-го пакета пароперегревателя, на вход второго (горячего). При таком способе регулирования температура вторичного пара практически не зависит от температуры первичного, но диапазон регулирования может быть достаточно широким.

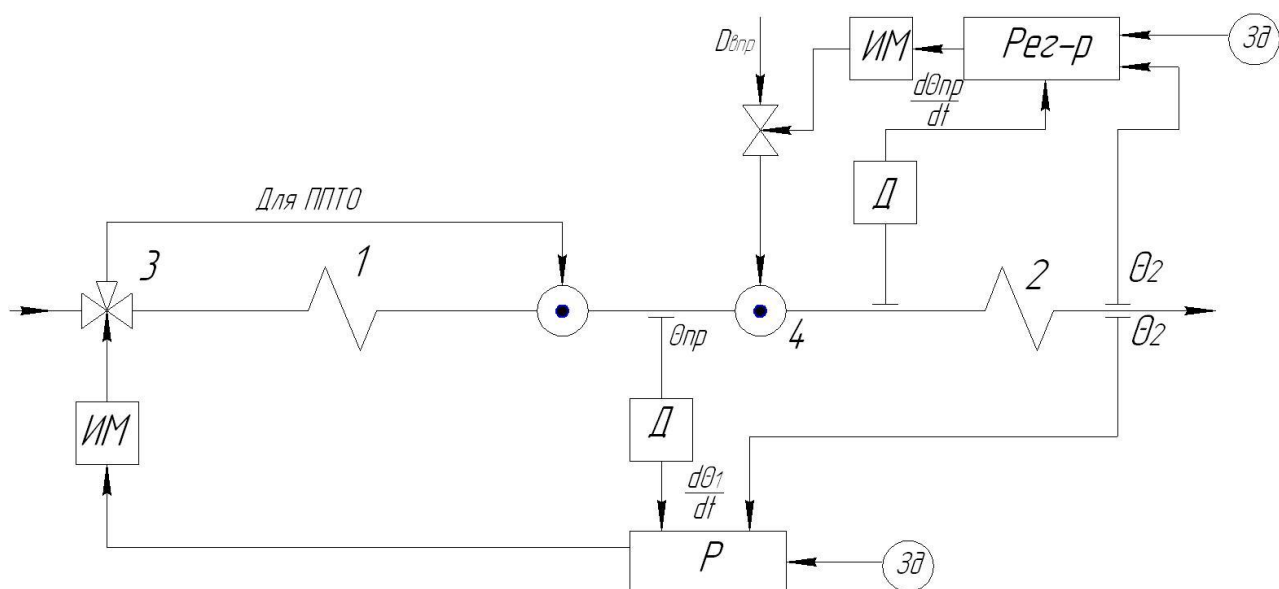


Рис. 12.15 Принципиальная схема регулирования температуры вторичного перегрева пара способом байпасирования.

1 – первичный «холодный» пакет (первая ступень промперегрева), 2 – вторичный «горячий» пакет (вторая ступень промперегрева), 3 – трехходовой клапан, 4 – впрыскивающий пароохладитель.

На ПИ-регулятор температуры подаются сигналы: основной – по отклонению температуры на выходе из вторичного пароперегревателя и дополнительный скоростной, исчезающий в статике, по температуре пара после смешения холодного и частичного перегретого пара.

Для предотвращения чрезмерного повышения температуры на выходе пароперегревателя предусматривается дополнительный впрыск (4). При этом заданное значение температуры на выходе пароперегревателя для основного регулятора устанавливается меньшим, чем у регулятора впрыска, с тем, чтобы клапан аварийного впрыска в нормальном режиме работы был закрыт. Возможность открытия клапана впрыска допускается только после полного открытия трехходового клапана.

Газовое регулирование. При этом способе регулирования изменение температуры вторичного пара осуществляется за счет изменения количества теплоты, передаваемой поверхностями нагрева топочными газами. Чтобы общий расход топочных газов оставался неизменным перераспределяют поток газов между газоходами конвективного пароперегревателя и водяного экономайзера.

Схема газового регулирования температуры вторичного пара перераспределением потока газов показана на рис 12.16.

На вход регулятора температуры вторичного пара при газовом регулировании подаются два сигнала: основной - по температуре вторичного пара на выходе вторичного пароперегревателя, дополнительный - по скорости изменения температуры газов перед вторичным пароперегревателем, исчезающий в статике.

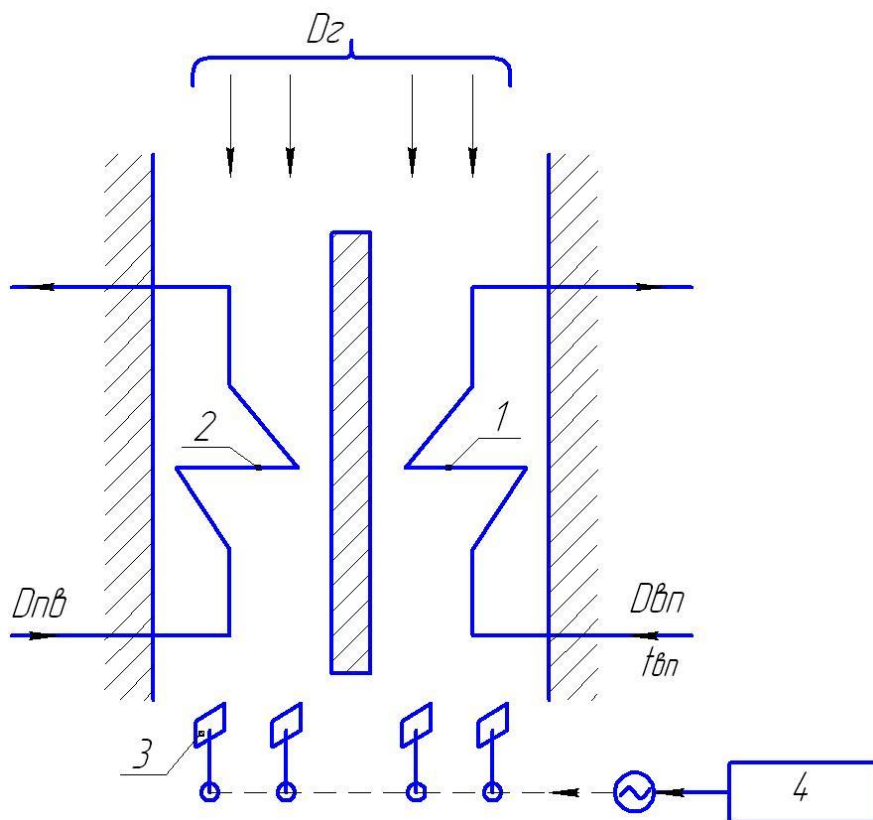


Рис. 12.16 Схема газового регулирования температуры вторичного перегрева пара.
 1 – вторичный пароперегреватель, 2 – экономайзер, 3 – поворотные заслонки, 4 – регулятор температур, $D_{пв}$ – расход питательной воды, $D_{вп}$ – расход вторичного пара, D_g – расход топочных газов, $t_{вп}$ – температура вторичного пара.

12.9 Регулирование непрерывной продувки барабанных паровых КОТЛОВ.

Химический состав воды, циркулирующий в барабанных котлах, оказывает существенное влияние на длительность их безостановочной работы и безремонтной компании. К основным показателям качества котловой воды относят общее солесодержание (концентрация солей в пересчете на соли NaCl мг/кг) и избыток содержания фосфатов PO_4^{-3} .

Повышение общего солесодержания может привести к уносу солей котловой воды в пароперегреватель и проточную часть турбоагрегата.

Недостаток концентрации фосфатов вызывает интенсивный процесс накипеобразования на внутренних поверхностях экранных труб, что ведет к ухудшению их охлаждения пароводяной смесью, а, следовательно, к перегреву в местах образования накипи и в конечном итоге к перегреву металла труб.

Поддержание общего солесодержания котловой воды в пределах нормы осуществляют с помощью непрерывной и периодических продувок из барабана в специальные расширители. Потери котловой воды с продувкой восполняют питательной водой в количестве, определяемом уровнем воды в барабане котельного агрегата.

Периодическую продувку для удаления скоплений шлама в нижних коллекторах выполняют 1-2 раза в смену и, как правило, не автоматизируют. Непрерывная продувка служит для удаления избытка соли NaCl и оксидов кремния SiO_2 , скапливающихся в котловой воде в процессе парообразования.

Регулирование непрерывной продувки осуществляют воздействием регулятора продувки на регулировочный клапан на линии продувки.

Схема автоматического регулирования непрерывной продувки представлена на рис. 12.17.

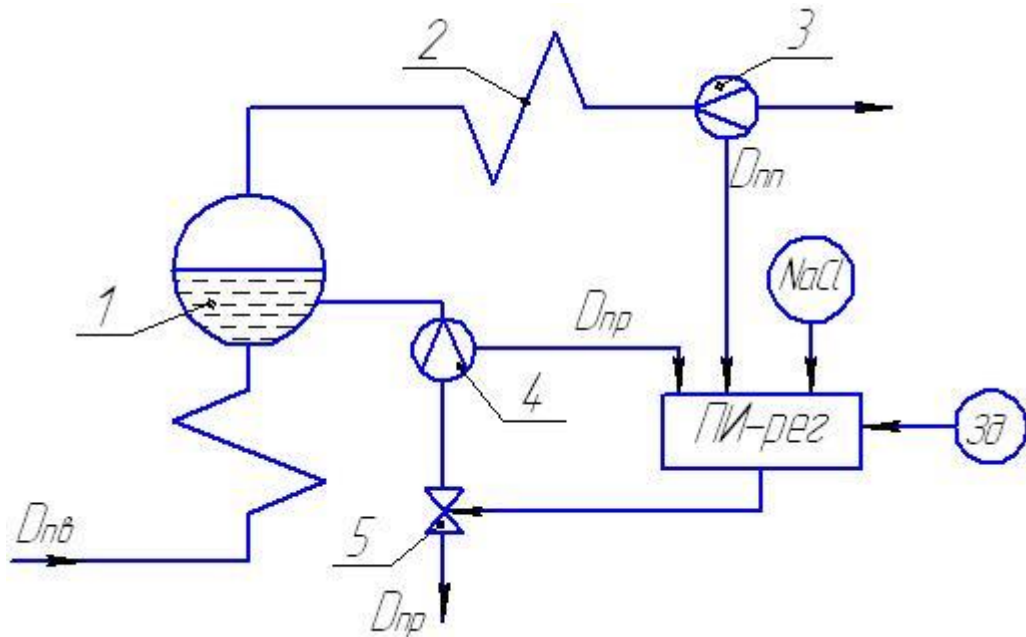


Рис. 12.17 принципиальная схема регулирования непрерывной продувки.

1 – барабан к/а, 2 – пароперегреватель, 3 – датчик расхода свежего пара $D_{пн}$, 4 – датчик расхода продувочной воды $D_{пр}$, 5 – регулирующий клапан продувки, ПИ-рег – регулятор продувки, Зд – задатчик ручного управления.

На вход ПИ-регулятора поступают сигналы по расходу пара $D_{пн}$ и расходу продувочной воды $D_{пр}$, а также корректирующий сигнал по содержанию солей NaCl.

Непрерывное измерение избытка фосфатов в воде затруднено из-за отсутствия соответствующего датчика. Требуемую концентрацию фосфатов устанавливают в зависимости от паровой нагрузки котла вводом фосфатов в чистый отсек барабана. Требуемое соотношение между содержанием фосфатов, паровой нагрузкой и непрерывной продувкой устанавливают по результатам теплехимических испытаний. Расход воды непрерывной продувки колеблется в пределах 0,5-2 % максимальной производительности парового котла.

ГЛАВА 13. РЕГУЛИРОВАНИЕ ПРЯМОТОЧНЫХ КОТЛОВ

Особенности прямоточных котлов как объектов регулирования:

- большая протяженность пароводяного тракта котла, который укрупнено может быть разделен на три зоны – экономайзерную или водяную, испарительную или переходную, пароперегревательную или паровую;
- положение точки границы между испарительной и перегревательными зонами, изменяется в зависимости от паропроизводительности котла, количества подводимой теплоты и расхода питательной воды.

В котлах на сверхкритические параметры пара испарительная зона отсутствует, четкой границы между водяной и паровой зонами нет.

Автоматическое регулирование работы прямоточных котлов сложнее, чем барабанных. Объясняется это, во-первых, тем, что на такие регулируемые величины прямоточного котла, как расход, давления и температура пара, существенно влияют несколько регулирующих воздействий, а именно расходы питательной воды, воды на впрыски, топлива, что приводит к возникновению взаимных связей между отдельными

регуляторами через объект регулирования. Во-вторых, играет роль и то, что возмущения топливом и питательной водой действуют в прямоточных котлах на температуру пара значительно интенсивнее, чем в барабанных. Последнее обстоятельство связано с тем, что суммарная аккумулирующая способность прямоточных котлов меньше, чем барабанных для одинаковой их паропроизводительности. Последнее обстоятельство затрудняет стабилизацию температуры пара.

13.1 Регулирование процессов горения и питания прямоточных котлов.

На отечественных прямоточных котлах применяют два варианта принципиальных схем регулирования питания и топлива.

В первом варианте на регулятор топлива возлагается функция поддержания заданной нагрузки котла, а на регулятор питания – функция приведения расхода питательной воды в соответствие с тепловой нагрузкой.

Схема регулирования реализована по принципу регулирования тепло-вода (рис 13.1.а).

Задающим сигналом регулятору топлива является сигнал по давлению пара (P_0) при выходе из котла или от задатчика ручного управления ($Зд$).

В качестве величины, характеризующей тепловую нагрузку котла, используются:

а) сигнал по расходу пара в промежуточном сечении пароводяного тракта (переходной зоне) до первого впрыска - «видимый» расход пара $D^{вид}_{пр}$, который отличается от действительного $D^0_{пр}$ из-за отклонения плотности пара $\rho_{пр}$ в месте установки сужающего устройства (диафрагмы) от принятого для его расчета значения ($\rho^0_{пр}$).

$$D^{вид}_{пр} = D^0_{пр} \sqrt{\rho^0_{пр} / \rho_{пр}}$$

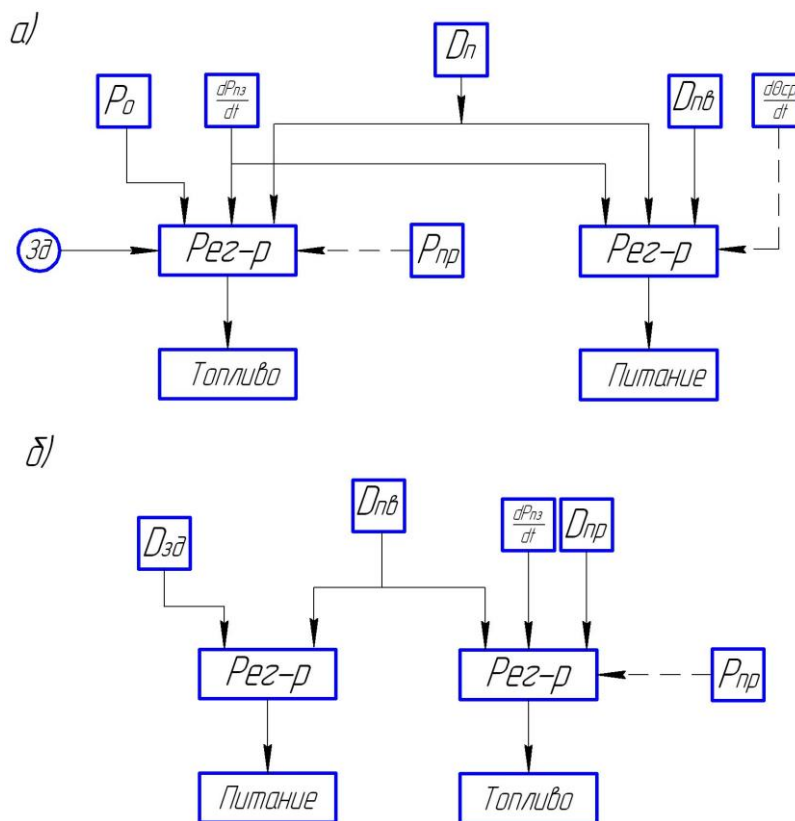


Рис. 13.1 Структурные схемы регулирования топлива и питания прямоточного котла.

б) сигнал по скорости изменения давления пара в переходной зоне $dP_{пз} / dt$. Этот сигнал компенсирует отклонение расхода пара, связанного с изменением аккумулированной теплоты при внешних изменениях нагрузки.

Кроме того, в этой схеме используется сигнал к регулятору топлива по давлению пара в промежуточной точке за диафрагмой ($P_{пр}$) для компенсации влияния отклонения этого давления от расчетного значения на видимый расход пара. Для устранения влияния впрысков на расход питательной воды и повышения устойчивости АСР к регулятору питательной воды подается сигнал по скорости изменения температуры пара в средней радиационной части после сужающего устройства $\frac{d\Theta_{cp}}{dt}$.

Применение схемы регулирования «топливо-вода» целесообразно при нестабильной работе пылеподающих устройств, недостаточном диапазоне регулирования топлива и других условиях, когда регулятор топлива не может обеспечить поддержания заданной тепловой нагрузки с такой точностью, чтобы без участия регулятора питания температура пара не выходила за допустимые пределы.

Во втором варианте схема регулирования организована по принципу «вода-тепло» (рис. 13.1,б). При этом регулятор питания поддерживает заданную нагрузку котла, а регулятор топлива приводит тепловую нагрузку в соответствие с расходом питательной воды.

К числу преимуществ второго варианта относят отсутствие связи регулятора питания через объект регулирования с регуляторами топлива и впрысков, что упрощает наладку и эксплуатацию системы регулирования, обеспечивает более точное поддержание температуры пара по пароводяному тракту в процессе изменения нагрузки котла и более точное поддержание нагрузки при топочных возмущениях.

Схемы регулирования воздуха и тяги аналогичны схемам для барабанных котлов.

13.2 Регулирование температуры пара прямоточных котлов.

Особенности прямоточного котельного агрегата как объекта регулирования температуры:

- на изменении температуры перегретого пара прямоточных котлоагрегатов резко сказываются любые возмущающие воздействия;
- недопустимо смещение границ фазового перехода испарительной и перегревательной зон при изменении режима работы котлоагрегата.

Регуляторы промежуточных впрысков на прямоточных котлах выполняют функции поддержания температуры и влажности пара в переходной зоне, а для котлов с сепарацией пара – влажности пара перед сепаратором. В схемах этих регуляторов широко применяются опережающие скоростные импульсы.

Так, регулятор первого по ходу пара и воды впрыска (рис 13.2,а) помимо основного сигнала по температуре пара за первым пакетом переходной зоны $\Theta''_{пз}$, воспринимает скоростной сигнал по влажности пара в начале пакета $\frac{d(1-x)_{пз}}{dt}$. Для регулятора второго

впрыска (рис 13.2,б) на котлах с промывочно-сепарационной схемой основным сигналом служит уровень в мерительном сосуде сепаратора $H_{сеп}$, характеризующий расход отсепарированной влаги, а опережающим – сигнал по скорости изменения влажности в начале переходной зоны. Регулятор выходного впрыска (рис 13.2,в) действует по температуре пара за котлом Θ''_n и скорости изменения температуры за впрыском $\frac{d\Theta'_n}{dt}$.

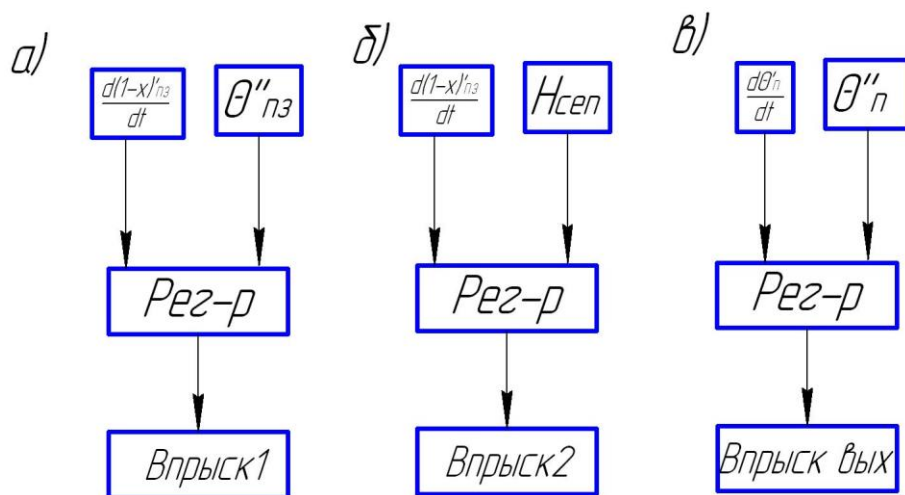


Рис. 13.2 Структурная схемы регулирования температуры пара.

Современные схемы регулирования отечественных прямоточных котлов дают возможность котлам работать в резко переменном режиме.

ГЛАВА 14. АВТОМАТИЗАЦИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ ТЭС

В системе топливоподачи автоматизируются следующие периодические операции:

1. пуск механизмов и ленточных транспортеров;
2. процесс загрузки бункеров сырого угля и отключение механизмов и транспортеров по окончании загрузки;
3. включение вибраторов при застревании угля в узлах пересылки;
4. останов всех предыдущих по ходу топлива транспортеров при пробуксовке, обрыве и сходе ленты или забивании приемных устройств на последующих транспортерах.

14.1 Регулирование пылесистем с шаровыми барабанными мельницами.

В системах пылеприготовления с промежуточным бункером размол и подсушку топлива осуществляют в шаровых барабанных тихоходных мельницах (ШБМ). Производительность ШБМ и расход топлива, поступающих в топку, не связаны между собой, так как ШБМ работает на промбункер пыли, откуда через шнековый питатель пыль поступает в топку. Производительность ШБМ и ее загрузка однозначно связаны лишь до определенных пределов, а именно, появления завала мельницы, когда чрезмерная толщина слоя топлива внутри мельницы препятствует захвату стальных шаров вращающимся барабаном, и масса шаров «проскальзывает» относительно его корпуса. Принципиальная схема регулирования пылесистемы с ШБМ представлена на рис. 14.1.

Регулирование загрузки мельницы. Загрузку ШБМ оценивают по перепаду давлений ΔP_m воздушной смеси до и после мельницы либо измерения разности скоростей смеси в тех же точках.

Стабилизацию загрузки осуществляют воздействием на положение ножа питателя сырого угля (ленточного или тарельчатого) в зависимости от значения выбранного показателя загрузки и перепада давления. Однако производительность мельницы желательно поддерживать не постоянной, а изменять в зависимости от вентиляции, уменьшая с

увеличением вентиляции и наоборот. Это позволяет стабилизировать дисперсность помола при нарушениях воздушного режима мельницы. В этом случае угрубление размола пыли, вызванное увеличением расхода воздуха, будет компенсироваться уменьшением загрузки мельницы. В схеме регулирования производительности мельницы (рис. 14.1) используется двухимпульсный регулятор загрузки мельницы (6) с жесткой обратной связью по положению регулировочного органа – шибера ленточного питателя (2) и основным сигналом по перепаду давлений аэросмеси на мельнице ΔP_M .

Регулирование разрежения перед мельницей. Шаровая барабанная мельница (4) должна находиться под постоянным разрежением, чтобы предотвратить выбивание пыли из ее горловин. Входным сигналом для ПИ-регулятора разрежения (7) является разрежение перед мельницей (S_M). Регулятор воздействует на заслонку (11) на линии подвода общего греющего воздуха к мельнице.

Регулирование температуры воздушной смеси за мельницей. Температуру аэросмеси за мельницей t_M стабилизируют в заданных пределах воздействием на расход смеси слабоподогретого и горячего воздуха. Правила технической эксплуатации котельных агрегатов устанавливают максимально допустимые значения температур аэросмеси за мельницей для топлив с влажностью до 25% - 70°C, для топлив с влажностью свыше 25% - 80°C, для тощих углей - 100°C. В качестве оптимальной принимается t_M на 3-5°C ниже максимально допустимой.

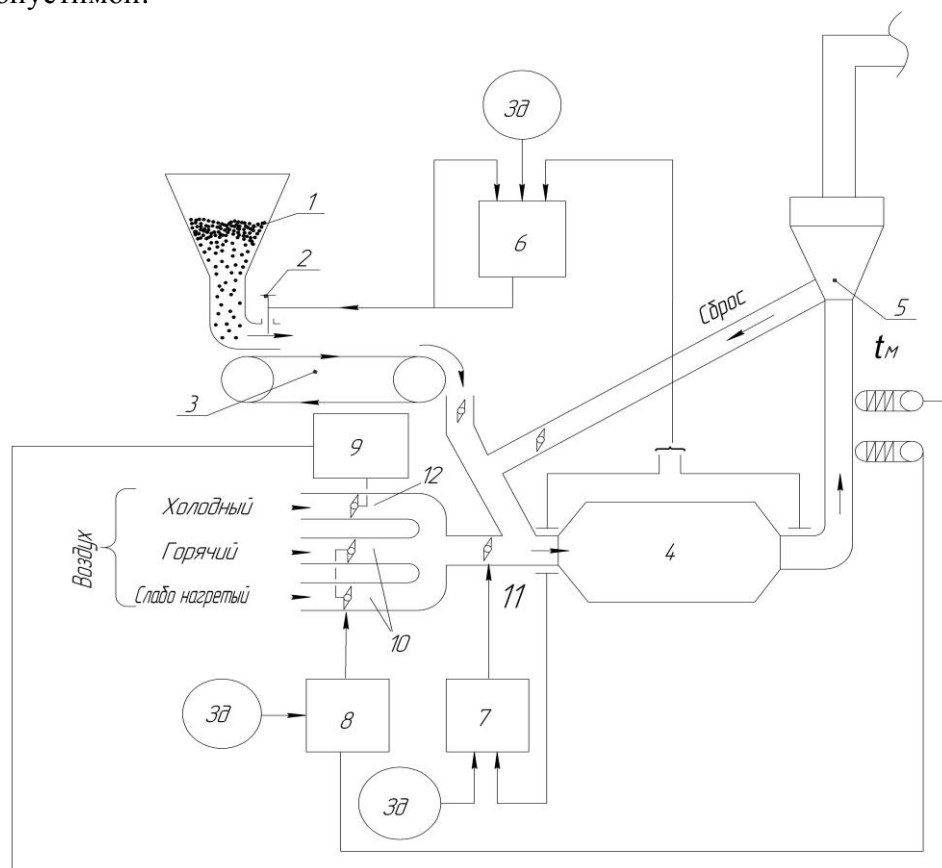


Рис. 14.1 Принципиальная схема регулирования пылесистемы с шаробарабанной мельницей.

1 – бункер сырого угля; 2 – шибер ленточного питателя; 3 – ленточный питатель топлива; 4 – шаробарабанная мельница; 5 – сепаратор; 6 – регулятор загрузки мельницы; 7 – регулятор разрежения во входной горловине мельницы; 8 – регулятор температуры аэросмеси за мельницей; 9 – регулятор аварийной присадки холодного воздуха; 10 – сепарационные заслонки; 11, 12 – заслонки; 3д – задатчик ручного управления.

ПИ-регулятор температуры аэросмеси (8) получает сигнал t_m от датчика температуры аэросмеси за мельницей и через исполнительный механизм перемещает в нужном направлении спаренные заслонки (10), установленные на линиях подачи слабоподогретого и горячего воздуха. Сочленение исполнительного механизма со спаренными заслонками выполнены так, что при открытии одной из них другая закрывалась и, наоборот, с тем, чтобы общий расход воздуха на мельницу оставался неизменным.

В пылесистемах со взрывоопасными топливами кроме регулятора температуры аэросмеси предусмотрен регулятор аварийной присадки холодного воздуха (9), открывающий заслонку (12) на линии подачи холодного воздуха в случае повышения температуры аэросмеси t_m сверх допустимого значения и размыкании концевого или путевого выключателя «меньше» исполнительного механизма регулятора температуры аэросмеси за мельницей.

14.2 Регулирование молотковых мельниц.

При камерном способе сжигания легко воспламеняющихся сортов топлива применяют пылесистемы с непосредственным вдуванием пыли в топку.

В отличие от шаровой барабанной мельницы, работающей на промежуточный бункер, подача молотковой мельницы непосредственно определяет расход топлива, поступающего в топку из бункера сырого угля.

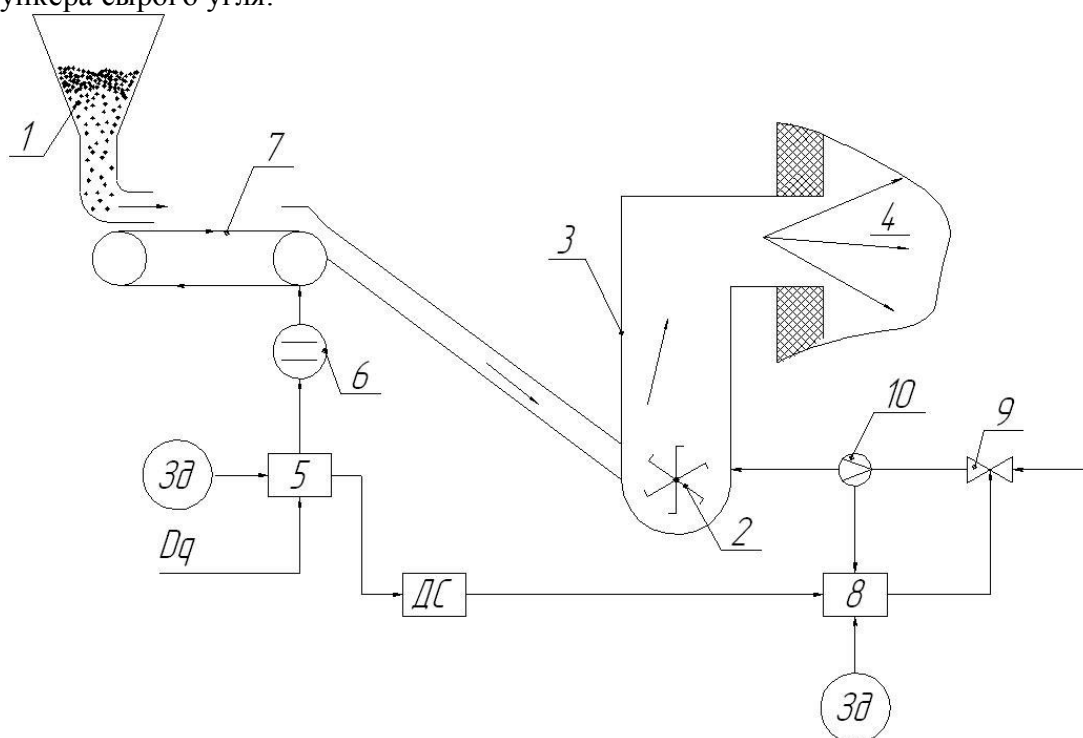


Рис. 14.2 Принципиальная схема регулирования пылесистемы с молотковой быстроходной мельницей.

1 – бункер сырого угля, 2 – молотковая быстроходная мельница (МБМ), 3 – шахта, 4 – топка, 5 – регулятор загрузки мельницы, 6 – электро привод, 7 – ленточный питатель сырого угля, 8 – регулятор расхода первичного воздуха, 9 – заслонка на подаче первичного воздуха, 10 – расходомер (сужающее устройство); ДС – устройство динамической связи.

Размол топлива осуществляется в молотковой быстроходной мельнице (МБМ). В ней же начинается подогрев аэросмеси, который завершается в шахте, соединяющей МБМ с топкой.

Система регулирования подачи топлива МБМ (рис. 14.2) связана с работой регуляторов тепловой нагрузки котла, задание от которого Dq поступает в АСП загрузки

мельницы. Регулятор загрузки мельницы поддерживает требуемую подачу топлива и оптимальную тонину помола пыли, воздействуя на электропривод с регулируемой частотой вращения (6), связанный с приводом барабана ленточного питателя сырого угля (7). Стабилизация требуемой тонины помола пыли осуществляется с помощью регулятора расхода первичного воздуха (8), действующего на заслонку (9) по сигналу перепада давления на сужающем устройстве (10), установленного на подводе греющего воздуха к мельнице (2).

Изменение подачи пыли при воздействии на загрузку мельницы (2) происходит со значительной инерцией. Для ускорения процесса изменения количества вдуваемой в топку пыли используется сигнал по тепловой нагрузке или сигнал динамической связи ДС от регулятора загрузки мельницы (5) на регулятор первичного воздуха (8).

Для стабилизации влажности пыли в заданных пределах предусмотрен регулятор температуры аэросмеси за мельницей, действующий на изменение соотношения расходов горячего и слабонагретого воздуха таким же способом, как и в системе регулятора температуры аэросмеси для котлоагрегатов с шаровыми барабанными мельницами.

ГЛАВА 15. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ТЕПЛОВЫЕ ЗАЩИТЫ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ ТЭС

15.1 Автоматические защитные устройства.

Автоматические тепловые защиты это автоматические защитные устройства (АЗУ), обслуживающие тепловую часть электрической станции.

АЗУ устанавливаются для контроля наиболее ответственных параметров, чрезмерное отклонение которых от заданных значений ведет к нарушению нормального технологического процесса и повреждению оборудования.

Большинство современных АЗУ представляют собой системы непрямого действия, включающие отдельные, связанные между собой элементы: первичные приборы-датчики, снабженные электрическими контактами, усилительные устройства, промежуточные реле, устройство пуска и останова исполнительных механизмов

Практически всегда действие тепловой защиты увязывается с работой логических систем управления, которые позволяют выключать и отключать электрические пусковые устройства вспомогательных механизмов в определенной последовательности – «по цепочке».

По степени воздействия на защищаемые установки защитные устройства разделяются на основные (главные) и местные (локальные).

К основным относятся защитные устройства, срабатывание которых приводит к останову котла или электроблока в целом или к глубокому снижению их нагрузки.

Локальные защиты предотвращают развитие аварии без останова основных агрегатов.

В качестве источников электрического питания защитных устройств на ТЭС служат аккумуляторные батареи с напряжением на выходе 220 В, которые обеспечивают электроснабжение цепей защиты при авариях, сопровождаемых полной потерей напряжения переменного тока в системе собственных нужд. Кроме того, питающее напряжение подводится к панелям защиты по двум независимым линиям, одна из которых является резервной. При этом сигнал об отклонении напряжения питания на каждую из групп защит автоматически передается на щит управления с помощью специальных устройств (световое табло, звуковой сигнал).

Мерой надежности тепловых защит служит среднее время наработки на один отказ или среднее время работы оборудования между двумя отказами.

$$\tau_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^n t_i / n ,$$

где t_i – время наработки на один отказ, n – число отказов.

В соответствии с нормативными требованиями $\tau_{\text{ср}}$ при проектировании систем защит должно быть не ниже 200 тыс. часов, но по опытным данным для реальных защит $\tau_{\text{ср}}$ пока не превышает 5-10 тыс. часов.

15.2 Автоматические защиты барабанных паровых котлов.

Защита от повышения давления пара. Паровой котел на случай повышения давления пара сверх допустимого снабжается предохранительными клапанами, действующими по принципу регуляторов давления «до себя» (управляющий сигнал на регулятор выбирается до регулирующего органа).

Клапаны устанавливаются на выходном коллекторе пароперегревателя и барабана котельной установки. Суммарная пропускная способность этих клапанов выбирается с некоторым запасом по отношению к максимальной паропроизводительности котла на случай отказа части клапанов.

При этом клапаны, установленные на выходном коллекторе, должны открываться раньше барабанных и при меньшем по абсолютному значению давлении пара на 0,2-0,3 МПа, с тем чтобы обеспечить охлаждение змеевиков пароперегревателя паром при наличии факела в топке.

На современных паровых котлах и паровых коллекторах в комплекте предохранительных клапанов используются специальные импульсные устройства – импульсные клапаны (рис. 15.1).

При нормальном давлении импульсный клапан (1) закрыт под давлением груза (2). Главный клапан (4) плотно закрыт под давлением пара в коллекторе. При повышении давления пара в коллекторе пароперегревателя сверх допустимого сначала открывается импульсный клапан (1) за счет того, что сила давления пара на запорную тарелку клапана превышает силу давления на нее со стороны груза (2).

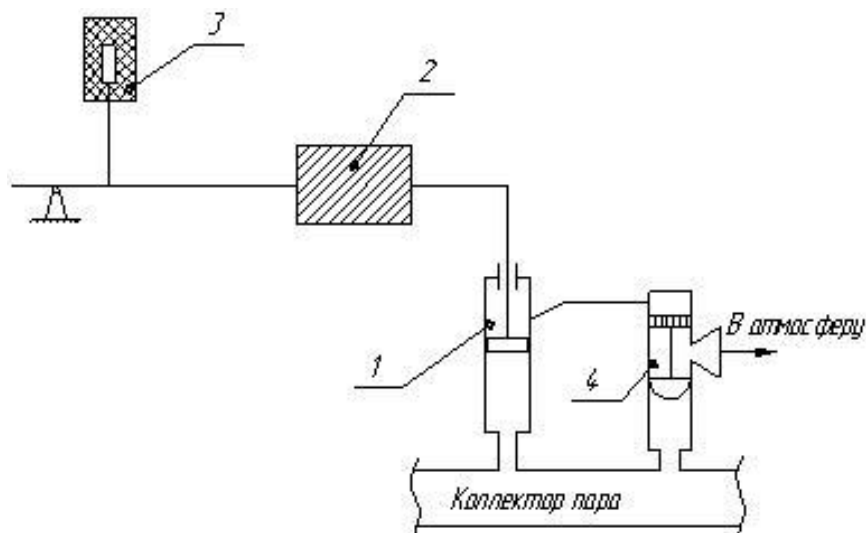


Рис. 15.1 Принципиальная схема импульсного предохранительного устройства.

1 – импульсный клапан, 2 – груз, 3 – электромагнит, 4 – главный предохранительный клапан.

Кроме того, импульсный клапан (1) может быть открыт под действием усилия электромагнита (3), который действует по сигналу от электроконтактного манометра.

При открытии импульсного клапана (1) давление пара над поршнем главного клапана (4) возрастает по сравнению с давлением в коллекторе, и поршень начнет смещаться вниз, открывая главный клапан (4). Это вызовет пропуск избыточного пара в атмосферу и восстановление давления пара в коллекторе паропровода до значения, при котором импульсный клапан (1) вновь закроется под действием груза (2) или электромагнита (3).

Прекращение доступа пара со стороны импульсного клапана (1) в надпоршневое пространство главного клапана (4) вызовет его закрытие под действием давления пара в коллекторе.

Защита по уровню воды в барабане. Упуск уровня и перепитка барабана относится к самым тяжелым авариям на ТЭС. Каждый паровой котел оснащается системой автоматической защиты от повышения и понижения уровня. Понижение уровня на 100-200 мм ниже установленного предела вызывает останов котельной установки – отключаются дутьевые вентиляторы и системы топливоснабжения.

Защита от понижения уровня выполняет одновременно функции защиты от разрыва экранных труб парового котла, так как упуск воды в барабане котла приводит к нарушению питания экранных труб и пережогу их при наличии факела в топке.

Защита от превышения уровня сверх установки сигнализации по уровню имеет два предела срабатывания. Достижение уровнем первого предела до 100 мм вызывает открытие запорных задвижек на линии аварийного сброса воды из барабана. При достижении уровнем второй предельной отметки (до 120-150 мм) действие защитных устройств должно привести к останову котла, как и при упуске воды.

Логические схемы защит осуществляют последовательность срабатывания пусковых и отключающих устройств. Так, для срабатывания защиты от повышения уровня в барабане до 2-го установленного значения на защитное устройство должны поступать сигналы датчиков уровня № 1 (100 мм) и № 2 (120)150 мм). Если сигнал поступает одновременно от двух датчиков, система защиты отключит дутьевой вентилятор и подачу топлива. Останов дутьевого вентилятора и прекращение подачи топлива в топку котельного агрегата должны вызвать закрытие главной паровой задвижки для прекращения доступа пара в котел из общей магистрали с одновременным открытием продувки пароперегревателя и закрытием запорного клапана на линии впрыска собственного конденсата для предотвращения доступа воды в парохладитель и паровой котел.

Защита от потускнения и погасания факела. В случае погасания факела в топке подача топлива на котел должна быть прекращена, так как его скопление может привести к образованию взрывоопасной смеси, одновременно отключаются дутьевые вентиляторы.

Паровые котлы, работающие на пылевидном топливе, дополнительно снабжаются защитой от потускнения факела, воздействующей на подачу резервного топлива - включение газовых горелок или мазутных форсунок при снижении уровня светимости факела.

Схема защиты содержит реле времени, которое задерживает команды на открытие клапана с электромагнитным приводом на линии резервного топлива на 5-10с., что необходимо для предотвращения ложных срабатываний в случае кратковременных потускнений (мерцаний) факела.

Защита от понижения температуры первичного перегретого пара. Автоматические защитные устройства этого вида выполняют роль защиты от заброса частиц воды в паропровод и проточную часть турбоагрегата.

При понижении температуры пара до предельного значения сигнал от температурного датчика (термопары) воздействует на останов дутьевого вентилятора и далее на останов котла.

В энергоблоках защита от понижения температуры пара относится к турбине и воздействует на закрытие его стопорного клапана.

Аналогично устроена защита от повышения температуры первичного пара сверх установленного максимально значения.

Защитные устройства мельничных систем парового котла. Помимо защит от повышения температуры аэросмеси за шаровой и молотковой мельницами, воздействующих на открытие заслонки на линии присадки холодного воздуха, на мельничных системах предусматривается защитное устройство, действующее на останов мельниц при понижении давления масла в системе смазки подшипников.

Этот сигнал формируется электроконтактным манометром. При падении давления масла до 1-го установленного значения включается резервный масляный насос. При падении давления масла до 2-го установленного значения срабатывает отключающее устройство электропривода мельницы и останавливается питатель сырого угля.

На обоих типах мельниц может быть предусмотрено включение вибраторов на линиях подвода сырого угля при забивании их и обрыве подачи топлива. Отключение вибраторов производится после восстановления подачи топлива или по истечении установленной выдержки времени.

В системах пылеприготовления с ШБМ при забиваниях циклона предусматривается отключение мельниц.

ГЛАВА 16. АВТОМАТИЗАЦИЯ ОТОПИТЕЛЬНЫХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КОТЕЛЬНЫХ

16.1 Автоматическое регулирование паровых барабанных котлов малой мощности.

В паровых котлоагрегатах типа ДКВР, ДЕ, ГМ-50 и БКЗ-75 регулируются процессы горения и питания котла водой.

Кроме того, для котлов БКЗ-75 и ГМ-50 предусматривается регулирование температуры перегретого пара и непрерывной продувки. Схемы автоматического регулирования для этих котлов определяются техническими условиями завода — изготовителя котлов. Автоматическое регулирование процесса горения включает регулирование подачи топлива в топку в зависимости от нагрузки котла поддержание оптимального соотношения топлива и воздуха для экономичного сжигания топлива, поддержание требуемого устойчивого разрежения в топке.

В схемах регулирования процессов горения для котлов, работающих на твердом топливе (пылеугольном) топливе, широко используется сигнал по тепловой нагрузке. При работе котла только на газообразном топливе, регулирование подачи топлива на котел упрощается, так как калорийность природного газа одного месторождения практически постоянна, а измерение расхода газа не вызывает трудностей.

Для группы котлов, работающих параллельно на общую паровую магистраль функции распределения нагрузки выполняет главный (корректирующий) регулятор, получающий сигнал по давлению пара в общей паровой магистрали. Главный регулятор корректирует работу подключенных к нему через переключатель нагрузки регуляторов тепловой нагрузки котлов (Рис. 16.1), а оптимальное распределение нагрузок между котлами устанавливается с помощью задатчиков регуляторов. Для перевода какого-либо из котлов в базовый режим работы прерывают сигнал к регулятору нагрузки этого котла от главного регулятора, устанавливая значение от задатчика ручного управления. Следует отметить, что

схемы регулирования процессов горения с использованием сигнала по тепловой нагрузке обычно применяют для котлов паропроизводительностью 50 т/ч и выше. Для котельных установок меньшей паропроизводительности, например, ДЕ и ДКВР применение сложных схем регулирования нецелесообразно.

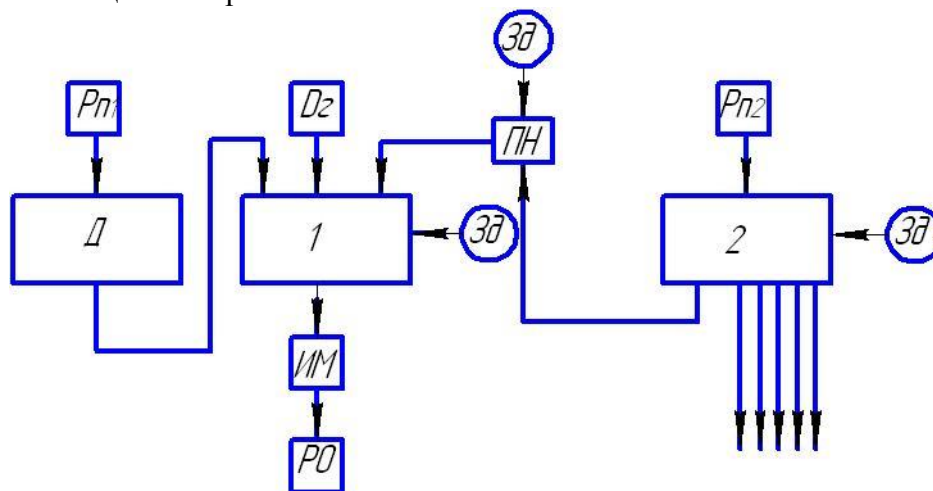


Рис. 16.1. Структурная схема регулирования нагрузки «по теплу».

1 — регулятор тепловой нагрузки; 2 — главный корректирующий регулятор давления; 3д — датчик; ИМ — исполнительный механизм; РО — регулировочный орган; Pn1 — давление пара в барабане котла; Pn2 — давление пара в общей магистрали; Д — дифференциатор; Dz — расход газа к котлу; ПН — переключатель нагрузки.

Для котлов ДЕ и ДКВР роль регулятора нагрузки выполняет регулятор давления пара в барабане котла, воздействуя на изменение подачи топлива (рис. 16.2). В этом случае регулирование паровой нагрузки параллельно работающих котлов (поддержание определенной зависимости между расходом пара от данного котла и давлением в общей паровой магистрали) осуществляется по одному из двух вариантов, приведенных на рис. 14.3, где p_1 и p_2 — давления в общей паровой магистрали, соответствующие минимальной и максимальной производительности котельной.

Разность $(p_1 - p_2)$ в первом случае характеризует абсолютную величину неравномерности регулирования давления в магистрали P_m во всем диапазоне изменения суммарной нагрузки параллельно работающих котлов, во втором случае — равна сумме абсолютных неравномерностей всех регуляторов нагрузки.

Для отопительно-производственных котельных, где величина P_m может колебаться в сторону уменьшения в пределах 0,15 — 0,2 Па, рекомендуется распределять нагрузки при параллельной работы котлов, согласно варианту, приведенному на рис. 16.3,б. В отдельных случаях могут составляться другие графики распределения нагрузки между котлами, являющиеся комбинациями графиков, приведенных на рис. 16.3.

Поддержание оптимального соотношения топлива и воздуха (избытка воздуха) осуществляется для экономичного сжигания топлива в топке котла

При работе котла на газообразном топливе для котлов ГМ-50 и БКЗ-75 рекомендуется включать регулятор нагрузки по схеме «топливо — воздух» (рис. 16.4,а). Регулятор получает два импульса: по расходу газа к котлу, который непосредственно измеряется с помощью диафрагмы и дифманометра, и второй импульс по перепаду давления воздуха на воздухоподогревателе, пропорционального расходу воздуха. Регулятор воздействует на направляющий аппарат дутьевого вентилятора.

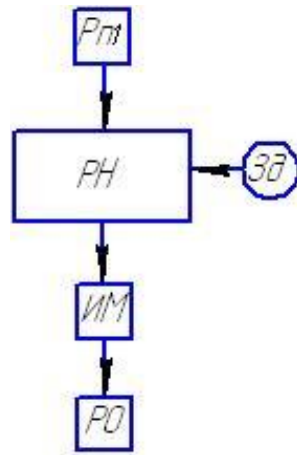


Рис. 16.2. Структурная схема регулирования нагрузки по давлению пара в барабане.
 P_{n1} — давление пара в барабане; PH — регулятор нагрузки; 30 — задатчик; $ИМ$ — исполнительный механизм; $РО$ — регулировочный орган.

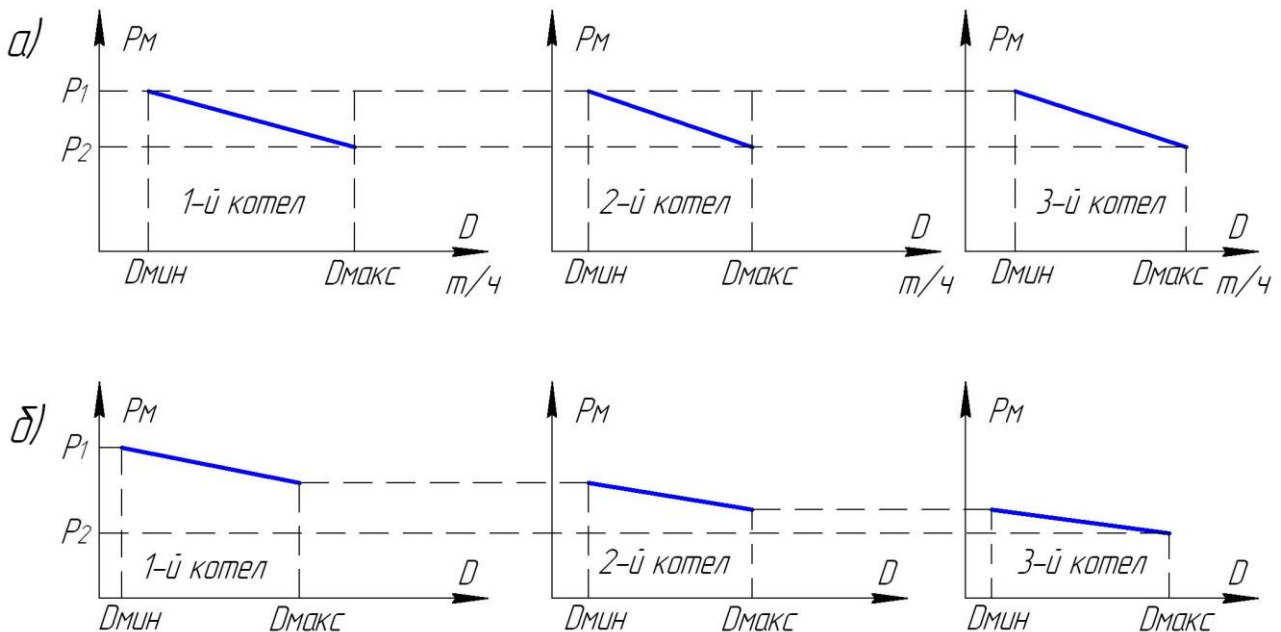


Рис. 16.3. Распределение нагрузки между котлами.

а — пропорционально номинальным производительностям параллельно работающим котлов; *б* — последовательное включение параллельно работающих котлов соответственно абсолютной неравномерности их регуляторов,
 P_m — давление пара в общей магистрали; D — расход пара.

В отдельных случаях, например, для котлов ДЕ и ДКВР, когда по конструктивным соображениям невозможно обеспечить необходимую длину газопровода для установки сужающего устройства, импульс по расходу газа можно заменить импульсом по давлению газа перед горелками, косвенно характеризующим расход газа. Следует иметь в виду, что импульс по давлению газа характеризует расход топлива только для котлов, в топке которых поддерживается устойчивое разрежение. При этом вторым импульсом, поступающим на регулятор, будет давление воздуха перед горелками (рис. 16.6,б). Статический напор воздуха в общем воздухопроводе перед горелками характеризует расход воздуха при условии, что сопротивление части воздухопровода между точкой отбора импульса и горелками будет постоянным т. е. на этом участке отсутствуют устройства, изменяющие сопротивление воздухопровода.

Для котлов, работающих на мазуте, при возможности измерения расхода мазута с помощью сопла профилем «четверть круга» или сдвоенной диафрагмы, схема топливо — воздух не отличается от схемы, показанной на рис. 16.6,а.

Для котлов ДЕ и ДКВР, работающих на мазуте и твердом топливе, импульсом, характеризующим расход топлива, является импульс от датчика перемещения регулировочного органа исполнительного механизма регулятора топлива. Расход топлива не всегда соответствует положению выходного звена исполнительного механизма, так как расходная характеристика регулировочного органа нелинейная, сочленение исполнительного механизма с регулировочным органом имеет люфты и пр.

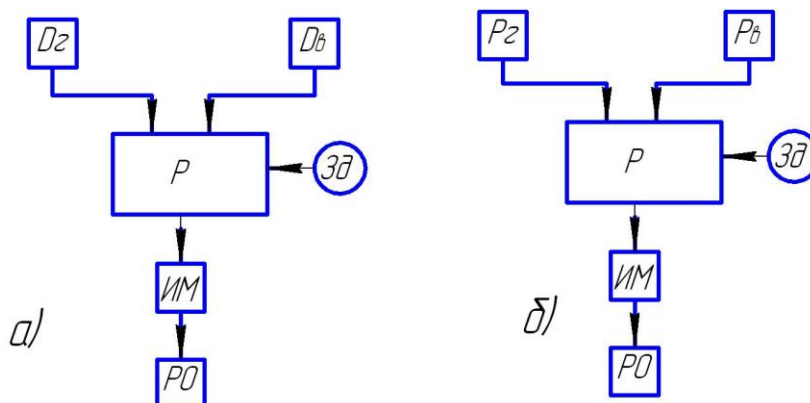


Рис. 16.4. Структурная схема регулирования воздуха (топливо — воздух).

D_z — расход газа к котлу; D_v — расход воздуха; P_z — давление газа к котлу; P_v — давление воздуха
 P — регулятор воздуха $Зд$ — задатчик; ИМ — исполнительный механизм; РО — регулировочный орган.

Создание устойчивого разрежения в топке котла должно осуществляться автоматически в пределах от -20 до -30 Па. В связи с тем, что топка котла является объектом со значительным самовыравниванием, регулирование может осуществляться одноимпульсным астатическим регулятором.

Регулятор разрежения получает импульс по разрежению в верхней части топочной камеры и воздействует на направляющий аппарат дымососа (рис. 16.5).

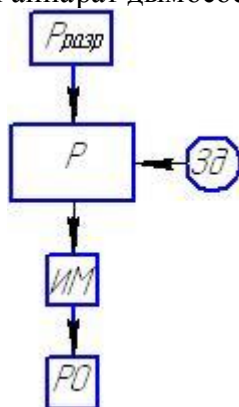


Рис. 16.5. Структурная схема регулирования разрежения.

$P_{разр}$ — датчик; P — регулятор разрежения; $Зд$ — задатчик; ИМ — исполнительный механизм; РО — регулировочный орган.

Для котлов производительностью выше 50 т/ч в схему регулятора для улучшения качества регулирования вводится исчезающая динамическая связь от регулятора воздуха. Регулирование питания котла осуществляется трехимпульсным регулятором уровня в барабане котла. Поддержание уровня воды в барабане котла в заданных пределах означает соответствие расходу пара (нагрузке) расхода питательной воды, поступающей в барабан.

Регулятор питания котлов ГМ-50 и БКЗ-75, представляет собой ПИ-регулятор, суммирующий три импульса: уровень в барабане, расход пара и расход питательной воды, что значительно улучшает качество регулирования, особенно при резкопеременных нагрузках.

Для котлов ДКВР и ДЕ, имеющих большой объем воды в барабане, поддержание уровня воды в требуемых пределах при малых колебаниях нагрузок достаточно хорошо обеспечивается одноимпульсным (по уровню) регулятором питания. Регулятор питания через исполнительный механизм воздействует на регулировочный клапан, установленный на трубопроводе питательной воды к котлам.

Необходимость регулирования температуры перегрева пара определяется условиями прочности металла и плавностью изменения температуры при колебаниях нагрузки. Для рассматриваемых типов котлов регулирование температуры осуществляется изменением расхода питательной воды через охладитель поверхностного типа, установленный в рассечку пароперегревателя.

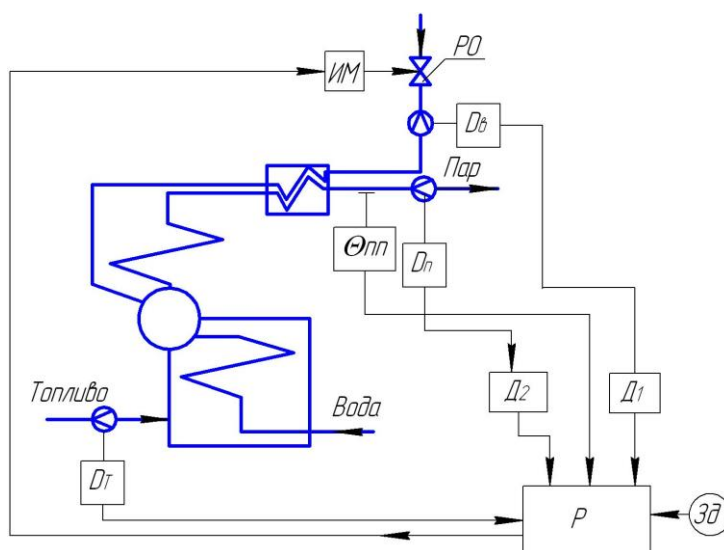


Рис. 16.6. Принципиальная схема регулирования температуры пара.

$Dв$ – расход воды на пароохладитель; $Dп$ – расход пара; $ДТ$ – расход топлива; $\Theta_{пп}$ – температура пара за пароперегревателем; $Д1$, $Д2$ – дифференциаторы; $Р$ – регулятор температуры; $Зд$ – задатчик; $ИМ$ – исполнительный механизм; $РО$ – регулировочный орган.

Наиболее распространенной схемой регулирования температуры пара является схема с двухимпульсным регулятором: по температуре пара на выходе из пароперегревателя и по скорости изменения температуры пара за пароохладителем. Однако эта схема не дает желательных результатов: слабая реакция на внешние возмущения, значительное запаздывание. Наиболее полно отвечает всем предъявляемым к ней требованиям схема регулирования, показанная на рис. 16.6.

Основным импульсом является температура пара за пароперегревателем. Регулятор температуры перегретого пара связан через объект регулирования — котел с регулятором питания, так как часть питательной воды, поступающей в барабан котла, проходит через пароохладитель. Поэтому для восприятия возмущений по питательной воде в схему вводится дополнительный импульс по скорости изменения расхода воды на пароохладитель.

При резкопеременных нагрузках для улучшения работы схемы рекомендуется вводить дополнительные импульсы по скорости изменения расхода пара от котла и расхода топлива к котлу, характеризующие равновесие теплового баланса пароперегревателя, но в статике эти сигналы отсутствуют, а $Dп$ и $ДТ$ не изменяются.

При испарении воды растворенные в ней соли не должны достигать определенной концентрации. Удаление этих солей производят с помощью непрерывной и периодической продувок. Для котлов производительностью более 50 т/ч процесс непрерывной продувки автоматизируется. Из-за отсутствия датчиков соледержания в котловой воде автоматическая продувка ведется пропорционально расходу пара. Регулятор продувки получает импульс по расходу пара и для улучшения работы схемы регулирования дополнительный импульс по положению регулировочного органа исполнительного механизма (рис. 16.7).

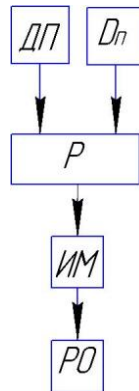


Рис. 16.7. Структурная схема регулирования непрерывной продувки.
 D_p — расход пара; ДП — датчик перемещения исполнительного механизма; P — регулятор непрерывной продувки; ИМ — исполнительный механизм; РО — регулировочный орган.

16.2 Автоматическое регулирование водогрейных котлов.

В настоящее время в промышленной энергетике широко применяются следующие типы водогрейных котлов: КВ-ГМ и ПТВМ-30м — для сжигания газа и мазута, ТВГ — для сжигания газа и КВ-ТС — для слоевого сжигания твердого топлива.

Регулятор нагрузки котла получает импульс по температуре воды за котлом и воздействует на изменение подачи топлива к котлу (рис. 16.8).

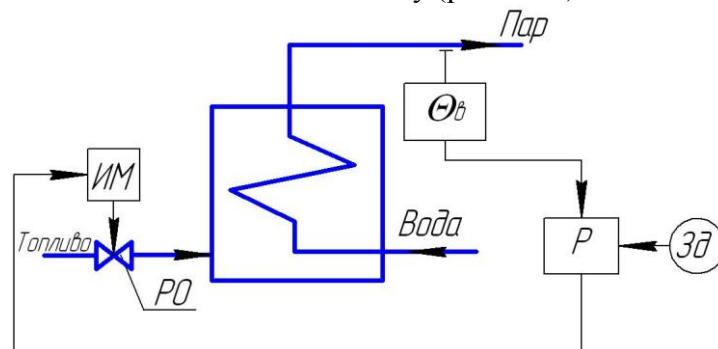


Рис. 16.8. Принципиальная схема регулирования нагрузки водогрейного котла.
 Θ_v — температура воды за котлом; P — регулятор нагрузки; Зд — задатчик; ИМ — исполнительный механизм; РО — регулировочный орган.

Для котлов КВ-ТС исполнительный механизм регулятора нагрузки воздействует на плунжер пневмозабрасывателя. Регулятор соотношения топлива и воздуха включается по схеме топливо — воздух и получает два импульса: по расходу топлива и давлению воздуха.

Для котлов производительностью до 20 Гкал/ч импульс по расходу топлива может быть заменен: при сжигании газа — импульсом по давлению газа перед горелками, при сжигании жидкого и твердого топлива — импульсом от датчика положения регулировочного органа исполнительного механизма регулятора нагрузки. Регулятор нагрузки воздействует на направляющий аппарат дутьевого вентилятора (при однозонных горелках) или на заслонку, установленную в воздуховоде вторичного воздуха к горелкам (при двухзонных

горелках). Для котлов ПТВМ-30 и КВ-ГМ-100, комплектуемых двумя дутьевыми вентиляторами, в схему включаются дополнительно следящий прибор и отдельные исполнительные механизмы для каждого направляющего аппарата вентиляторов (рис. 16.9).

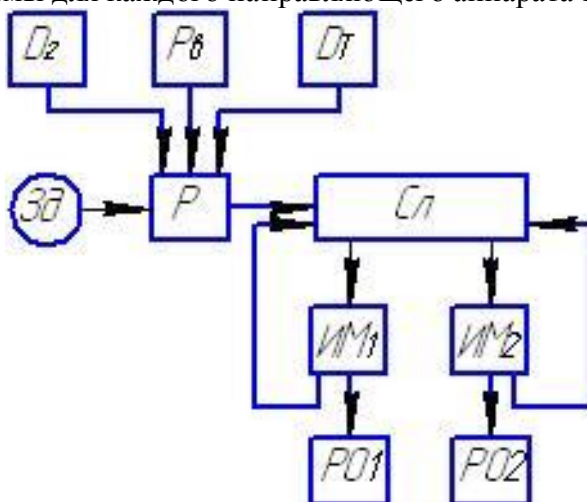


Рис. 16.9. Структурная схема регулирования воздуха (топливо — воздух).

Dz — расход газа к котлу; $Pв$ — давление воздуха перед котлом; Dt — расход топлива к котлу; P — регулятор воздуха; $Зд$ — задатчик; $Сл$ — следящий прибор; $ИМ1, ИМ2$ — исполнительные механизмы; $РО1, РО2$ — регулировочные органы.

Работа регулятора разрежения не отличается от работы аналогичного регулятора для паровых котлов.

16.3 Автоматическое регулирование вспомогательного оборудования.

Действующими Санитарными Нормами и Правилами автоматически требуется регулировать следующие параметры:

- а) давление пара за редукционными (РУ) и редукционно-охлаждающими (РОУ) установками;
- б) температуру пара за РОУ;
- в) давление в деаэраторе атмосферного типа (разрежение в вакуумном деаэраторе);
- г) уровень в баке-аккумуляторе деаэратора;
- д) давление жидкого топлива в общем напорном трубопроводе.

В отопительных котельных дополнительно регулируются:

- температура воды подаваемой в теплосеть;
- давление в обратном коллекторе теплосети (подпитка);
- температура воды в сети горячего водоснабжения (для систем с закрытым водоразбором);
- давление в циркуляционном контуре сети горячего водоснабжения;
- постоянный расход воды к котлам.

Автоматическое регулирование редукционных установок. Автоматическое регулирование редукционных установок (РУ) в котельных, вырабатывающих насыщенный пар, заключается в поддержании заданного (пониженного) давления пара после редуцирования. Единственным возмущающим воздействием на регулируемую величину является изменение потребления пара. С точки зрения динамической характеристики РУ является объектом с распределенной по длине емкостью. Учитывая, что РУ обладает значительным самовыравниванием, а отбор импульса осуществляется вблизи РУ, можно считать редукционную установку одноемкостным объектом с самовыравниванием.

Регулятор давления получает импульс по давлению пара после РУ и воздействует через исполнительный механизм на регулировочный клапан на паровом коллекторе.

При выработке котлом перегретого пара для понижения его давления и температуры применяется РОУ. Регулятор давления работает так же, как и в схеме с РУ. Регулирование температуры осуществляется впрыском питательной воды.

Для улучшения качества регулирования следует одновременно изменять и давление и температуру перегретого пара. С этой целью от регулятора давления к регулятору температуры предусмотрена динамическая связь.

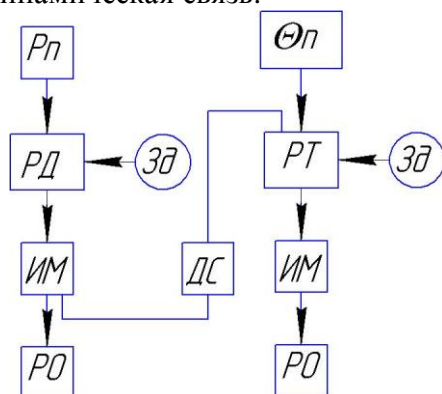


Рис. 16.10. Структурная схема автоматического регулирования РОУ.

P_n — давление пара после РОУ; T — температура пара после РОУ; $PД$ — регулятор давления пара; $PТ$ — регулятор температуры пара; $ДС$ — динамическая связь; $Зд$ — задатчик; $ИМ$ — исполнительный механизм; PO — регулировочный орган.

Регулирование деаэраторов. В котельных с паровыми котлами термическая деаэрация (удаление из воды растворенных в ней газов) производится в деаэраторах атмосферного типа. Причиной коррозии трубных систем котла и вспомогательного оборудования являются в первую очередь растворенный в воде кислород, а также углекислый газ. Растворимость газа зависит от температуры: при повышении температуры она уменьшается, а в кипящей воде близка к нулю. Для нагрева воды до 104°C в деаэратор подается пар, расход которого регулируется для деаэраторов с барботажным устройством по давлению в паровом пространстве бака-аккумулятора.

Для восприятия неизбежных потерь конденсата на производстве в деаэратор поступает химически очищенная вода. Регулятор уровня в деаэраторном баке воздействует на изменение расхода воды (рис. 16.11).

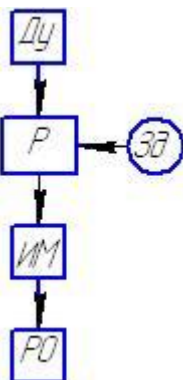


Рис. 16.11. Структурная схема регулирования уровня в деаэраторе.
 D_u — датчик уровня; P — регулятор уровня; $ИМ$ — исполнительный механизм; PO — регулировочный орган; $Зд$ — задатчик.

Для деаэраторов одного давления, работающих параллельно, следует применять один регулятор давления пара и один регулятор уровня воды в баках на группу деаэраторов. В этом случае деаэраторы должны иметь уравнительные линии по воде и пару.

Регулирование давления в подающем мазутопроводе. Поддержание постоянного давления мазута в напорном трубопроводе, так же как и давления воды в питательных магистралях, преследует цель стабилизации давления перед регулировочным клапаном топлива и питания котла.

Регулировочный клапан регулятора давления мазута устанавливается на циркуляционном мазутопроводе и мазутонасосную, а регулятора давления питательной воды на линии сброса ее в деаэрактор.

Регулирование температуры мазута. Регулирование температуры мазута, поступающего в горелки, производится, как правило, в мазутонасосных, где размещаются подогреватели мазута. При небольших расходах мазута на каждом подогревателе рекомендуется устанавливать регуляторы температуры прямого действия. Если не удастся подобрать регуляторы температуры прямого действия, следует устанавливать общий регулятор на группу подогревателей.

Все регуляторы вспомогательного оборудования реализуют П – или ПИ – законы в зависимости от необходимой точности поддержания регулируемого параметра либо используются регуляторы прямого действия. Выбор закона регулирования и требуемое качество переходных процессов регламентируется заводом изготовителем технологического оборудования, либо инженерно-конструкторской организацией.

16.4 Автоматизация процессов в тепловых сетях.

Автоматизация отпуска тепла. В отопительно-производственных котельных, где для нужд отопления устанавливаются подогревательные установки, для поддержания температуры воды в теплосети в соответствии с отопительным графиком необходимо предусматривать регулятор температуры. Отопительный график котельной выражает зависимость температуры сетевой воды от температуры наружного воздуха. Схема регулятора температуры сетевой воды с коррекцией по температуре наружного воздуха не оправдала себя, потому что датчик температуры наружного воздуха не в состоянии учесть влияние направления ветра, его силу, интенсивность солнечной радиации, температуру помещений и еще ряд факторов, влияющих на теплоемкость отапливаемых зданий, поэтому необходимая температура сетевой воды, которую должен поддерживать регулятор, определяется оператором по отопительному графику и задается вручную. Как правило, это средняя температура за прошедшие 0,5 сут.

В котельных, предназначенных для теплоснабжения только зданий с периодическим пребыванием людей (учреждения, зрелищные предприятия и т. п.), рекомендуется предусматривать возможности программного регулирования отпуска тепла с целью экономии топлива за счет снижения температуры помещений на периоды отсутствия людей.

Температура воды в теплосети может поддерживаться несколькими способами:

- воздействием на расход пара, подаваемого на подогреватель;
- изменением поверхности нагрева подогревателя;
- подмешиванием части обратной сетевой воды в прямую.

Регулирование температуры сетевой воды изменением расхода насыщенного пара имеет определенные недостатки: неудовлетворительная работа регулировочного клапана на насыщенном паре низкого давления и возможность появления вакуума в паровом пространстве подогревателя при температуре насыщенного пара меньше 100°C, снижение давления конденсата (при малых нагрузках) ниже величины, необходимой для его поступления в деаэрактор.

При регулировании изменением поверхности нагрева подогревателя регулировочный орган устанавливается на линии конденсата после подогревателя, и в зависимости от

температуры сетевой воды часть поверхности нагрева затопляется конденсатом и исключается из активного теплообмена. При этом способе диапазон регулирования невелик и быстрее выходят из строя поверхности нагрева подогревателя. При регулировании подмешивания регулировочный орган устанавливается на обводной линии подогревателя или группы подогревателей, пропуская часть обратной сетевой воды непосредственно в теплосеть, минуя подогреватели. Структурная схема регулирования аналогична схеме на рис. 16.8. Эта схема регулирования получила наиболее широкое распространение. Однако ее применение требует детального расчета сопротивления обводной линии.

Регулирование подпитки тепловой сети. Регулирование подпитки теплосети ведется в зависимости от величины давления обратной сетевой воды на всасе сетевых насосов. Задача регулятора подпитки заключается в сохранении постоянного пьезометрического графика тепловой сети. Для теплосетей, выполненных с закрытой схемой водоразбора, подпитка составляет приблизительно 2% количества циркулирующей воды. При небольших расходах можно устанавливать регулятор давления прямого действия. Динамическая характеристика процесса подпитки может быть принята, как для одноемкостного объекта с самовыравниванием, и поэтому для регулирования давления воды на всасе сетевых насосов рекомендуется применять статический регулятор.

В котельных, имеющих подогреватели для нужд горячего водоснабжения, необходимо поддерживать температуру воды постоянной (не выше 70°C).

Автоматическое регулирование температуры воды в теплосети. Регулирование температуры воды в теплосети в котельной с водогрейными котлами связано с регулированием температуры воды за котлами и расходом воды через котлы. На рис. 16.12 и 16.13 представлены функциональные схемы автоматизации водогрейной котельной, работающей на жидком и газообразном топливе. Технологические требования, предъявляемые к системе регулирования, следующие: температура воды в теплосеть должна поддерживаться в соответствии с отопительным графиком; расход воды через котлы должен быть постоянным; температура воды на выходе из котлов должна быть не выше 150°C.

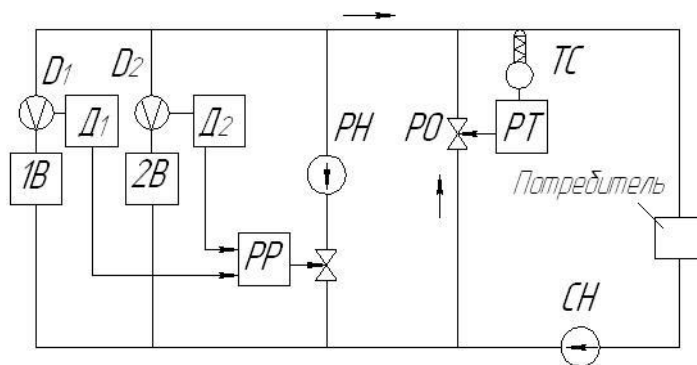


Рис. 16.12. Функциональная схема автоматического регулирования водогрейной котельной.
 1В, 2В — котлы; РН — насос рециркуляционной воды; СН — насос сетевой воды; D1, D2 — диафрагмы; Д1, Д2 — датчики; РР — регулятор постоянного расхода воды к котлам; Т — термометр; РТ — регулятор температуры воды в теплосеть; РО — регулировочный орган.

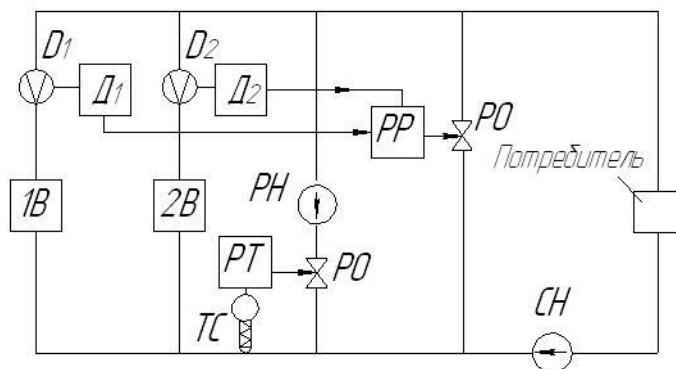


Рис. 16.13. Функциональная схема автоматического регулирования водогрейной котельной (топливо — газ).

1В, 2В — котлы; РН — насос рециркуляционной воды; СН — насос сетевой воды; Д1, Д2 — диафрагмы; Д1, Д2 — датчики; РР — регулятор постоянного расхода воды к котлам; ТС — термометр сопротивления; РТ — регулятор температуры воды к котлам; РО — регулировочный орган.

При работе водогрейных котлов на сернистом мазуте для исключения влияния коррозии конвективных поверхностей нагрева, вызываемых конденсацией серной кислоты, температуру воды на выходе из котла необходимо поддерживать постоянной, равной 150°C.

В этом случае температуру воды в теплосеть поддерживает регулятор температуры, воздействуя на расход воды через перемычку, а постоянный расход воды к котлам обеспечивает регулятор расхода, получающий суммарный импульс по расходу воды за котлами и воздействующий на подачу воды к котлам из контура рециркуляции.

Постоянный расход воды к каждому котлу обеспечивается при наладке путем выравнивания гидравлических сопротивлений трубопроводов с помощью дроссельных шайб от коллектора обратной сетевой воды до котла. Для котлов, сжигающих только газообразное топливо, температура воды на входе должна быть не менее 70°C во избежание появления коррозии и для обеспечения паспортной производительности котла. В этом случае схема автоматизации несколько видоизменяется (рис. 16.13): температура воды в теплосети поддерживается регуляторами нагрузки котлов; регулирование температуры воды перед котлами осуществляет регулятор, получая импульс по температуре воды перед котлами и воздействуя на подачу воды из контура рециркуляции. Регулирование постоянного расхода воды к котлам осуществляет регулятор, пропуская часть воды из обратной линии тепловой сети в прямую линию. В водогрейных котельных, где отсутствует теплоноситель пар, широкое применение получили вакуумные деаэратеры. Давление 7,5 кПа или 30 кПа, создаваемое эжекторами, обеспечивает температуру воды на выходе из деаэратора соответственно 40 либо 70°C. Вода для деаэрации поступает с температурой на 15—25°C ниже температуры кипения. Для догрева воды до температуры кипения непосредственно в деаэратор подается высокотемпературная вода. Остаточная концентрация растворенного в воде кислорода после деаэрирования от 30 до 50 мкг/кг в зависимости от схемы теплоснабжения. Автоматическое регулирование процесса деаэрации в вакуумных деаэраторах, работающих с давлением $3 \cdot 10^4$ Па, осуществляется двумя регуляторами. Первый из них поддерживает постоянной температуру 55°C воды, прошедшей водоподготовку, воздействуя на подачу в подогреватели высокотемпературной воды от котлов, и второй, получая импульс по величине вакуума в деаэраторе, подает высокотемпературную воду непосредственно в деаэратор, догревая воду до 70°C. Если деаэратор работает с давлением $7,5 \cdot 10^3$ Па (температура на выходе равна 40°C), то в деаэратор сразу подается химически очищенная вода, без подогрева, так как ее температура 25—30°C и первый регулятор не нужен. Уровень в вакуумных деаэраторах регулируется так же, как и атмосферных (рис. 16.11).

16.5 Автоматическое регулирование котлов малой производительности.

Паровые котлы типов Е-1/9-Г паропроизводительностью 1 т/ч и давлением 0,8 и Е-0,4/9-Г паропроизводительностью 0,4 т/ч, работающие на газообразном топливе, полностью автоматизированы. Котлы поставляются комплектно с системой автоматикой для микрокотлов (АМК). Система осуществляет автоматический пуск котла, защиту его при аварийных отклонениях основных параметров, сигнализацию этих отклонений, а также поддержание в заданных пределах: давления пара в барабане; уровня воды в барабане; подачи воздуха в топку в соответствии с подачей топлива. Поскольку эти котлы работают под наддувом, отпадает необходимость в регулировании разрежения. Требуемая точность поддержания регулируемых параметров обеспечивается применением двухпозиционных регуляторов, что объясняется незначительными скоростями разгона котла по регулируемым параметрам: уровню и давлению в барабане.

Для регулирования давления пара в системе автоматикой предусмотрены два клапана: «малого» и «большого» горения. Клапан «малого» горения постоянно открыт. При поступлении командного импульса клапан «большого» горения отключается или включается, что обеспечивает работу котла в диапазоне нагрузок 40—100%. Частота срабатывания клапана «большого» горения определяется величиной зоны возврата контактного устройства датчика и колебаниями нагрузки.

Регулятор уровня получает команду от двух электродов (верхнего и нижнего уровня), установленных в уровнемерной колонке, поставляемой с котлом.

Регулирование подачи воздуха в топку в соответствии с количеством сжигаемого топлива осуществляется также регулятором давления пара путем электрической блокировки электромагнитного исполнительного механизма через цепи управления с соленоидным клапаном «большого» горения. При открытии клапана «большого» горения максимально открывается заслонка на воздуховоде за дутьевым вентилятором.

Положения минимального и максимального открытия заслонки на воздуховоде определяются в процессе наладки агрегата в соответствии с режимной картой и устанавливаются с помощью регулировочных винтов, имеющих в приводе заслонки.

Паровые котлы Е-1/9-Ж и Е-0,4/9-Ж, работающие на легком топливе (печное, дизельное), комплектуются системой АМК. Однако соленоидные клапаны, регулирующие подачу топлива, с системой АМК не поставляются.

Кроме регуляторов, обеспечивающих поддержание давления, уровня и соотношения топливо — воздух, дополнительно предусмотрен двухпозиционный регулятор, поддерживающий постоянную температуру топлива включением или отключением электронагревателя, установленного на топливопроводе. Электронагреватель предназначен только для догрева топлива перед поступлением его в форсунку, а для поддержания необходимой температуры топлива в общей топливной системе котельной должен быть предусмотрен отдельный регулятор.

Котлы Е-1/9-М, предназначенные для работы на мазуте, оборудованы горелочным устройством АР-90, которое состоит из ротационной форсунки Р-90 и щита управления. На щите, кроме цепей управления электродвигателями дымососа, питательного насоса и схемы защиты, собрана схема двухпозиционного регулятора уровня воды в котле, работающего от двух датчиков (верхнего и нижнего уровня). Регулятор с помощью магнитного пускателя воздействует на включение или отключение электропривода питательного насоса.

Котлы Е-1/9-1, предназначенные для работы на твердом топливе, оснащаются пультом управления, на котором также установлен двухпозиционный регулятор уровня воды в котле. Регулятор аналогичен регулятору уровня, установленному на котле Е-1/9-М.

Чугунные секционные паровые и водогрейные котлы типов «Энергия», «Универсал», «Минск» часто оборудуются системой автоматического регулирования отопительных котельных АМКО. Система АМКО при сжигании газообразного топлива обеспечивает

двухпозиционное регулирование тех же параметров, что и система АМК. Система АМКО, кроме того, включает в себя общекотельный регулятор, который в зависимости от типа устанавливаемых котлов, поддерживает в заданных пределах либо температуру сетевой воды на выходе из котельной, либо давление пара в коллекторе.

В качестве общекотельного регулятора используется позиционный регулирующий прибор типа ПРП, получающий импульсы или от термометра сопротивления (водогрейные котлы), или от дифференциально-трансформаторного датчика давления (паровые котлы). Контакты микропереключателей на выходе регулирующей прибора воздействуют на включение или отключение топливных клапанов котлов. Полное отключение котла происходит при отключении клапана малого горения. В этом случае включение котла производится вручную. При работе котлов на жидком топливе из-за отсутствия до настоящего времени электромагнитных клапанов регулирование нагрузки котлов осуществляется вручную.

16.6 Автоматическое регулирование процессов водоподготовки.

Повышенные требования к качеству воды, поступающей для питания паровых котлов или подпитки теплосети, вызывают осложнения цикла водоподготовки, особенно в тех случаях, когда источником водоснабжения являются поверхностные источники.

Наряду с регулированием таких процессов, как подогрев исходной воды или поддержание постоянного уровня в баках декарбонизированной воды, возникают задачи, связанные с автоматизацией работы осветлителей и программным управлением процессом восстановления фильтров (механических, H- или Na-катионитовых).

Автоматизация осветлителя включает регулирование нагрузки осветлителя; поддержание постоянной температуры воды к осветлителю; поддержание определенного соотношения между количеством воды, поступающей на осветление, и количеством регенерируемой воды (вода, возвращаемая в осветлитель после промывки механических фильтров); дозирование раствора реагентов.

Регулирование производительности осветлителя (рис. 16.14) осуществляется по уровню в баке осветленной воды. Регулятор воздействует на подачу воды к осветлителю. Уровень в баке зависит от производительности установки для водоподготовки и расходов на ее собственные нужды (например, промывка фильтров).

Следует иметь в виду, что при стабильной нагрузке осветлителя улучшаются условия сохранения слоя взвешенного осадка (шлама), улучшается качество осветленной воды, облегчается работа дозирующих устройств. Стабилизация нагрузки достигается созданием в баке осветленной воды нерегулируемого объема (20—25% емкости бака), в пределах которого изменение уровня не вызывает срабатывания регулятора. Это осуществляется увеличением зоны нечувствительности регулятора. Для улучшения работы АСР в качестве обратной связи вводится дополнительный импульс по расходу воды на осветлитель.

При резкопеременных нагрузках с большими амплитудами рекомендуется отключать воздействие регулятора при снижении расхода воды к осветлителю до 30 и повышении до 125% номинального. При установке группы осветлителей у каждого предусматривается свой бак и индивидуальный регулятор производительности.

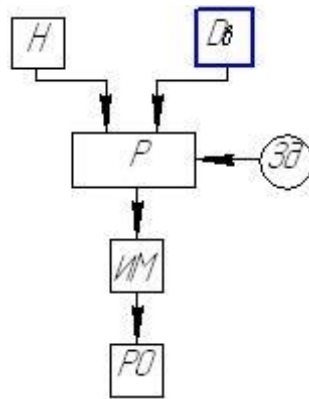


Рис. 16.14. Структурная схема регулирования производительности осветителя.
 $Dв$ — расход воды к осветителю; H — уровень в баке осветленной воды P — регулятор производительности; $Зд$ — задатчик; ИМ — исполнительный механизм, РО — регулировочный орган.

Регулирование температуры воды, подаваемой к осветителю (рис. 16.15), должно осуществляться с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$. Отклонение свыше 1°C , ведет к нарушению процесса кристаллизации в осветителе. Регулятор получает импульс по температуре воды за подогревателем и воздействует на подачу теплоносителя к подогревателю или к группе параллельно работающих подогревателей.

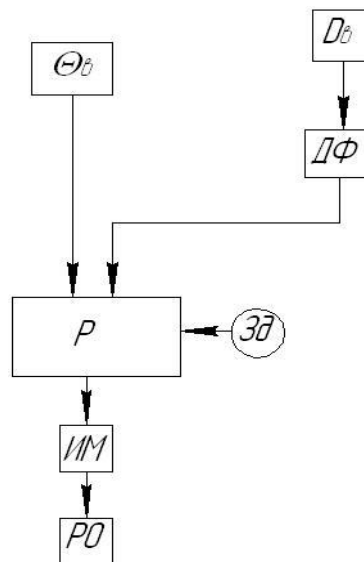


Рис. 16.15. Структурная схема регулирования температуры воды к осветителю.
 $\Theta_в$ — температура воды за подогревателем; $Dв$ — расход воды за подогревателем; P — регулятор температуры; $ДФ$ — дифференциатор; $Зд$ — задатчик; ИМ — исполнительный механизм; РО — регулировочный орган.

При резкопеременных нагрузках следует вводить дополнительный импульс по скорости изменения расхода воды через подогреватель и устанавливать регуляторы на каждый подогреватель.

Кроме исходной воды, в осветителе поступает вода, собираемая после отмывки механических фильтров. Как правило, фильтры отмываются осветленной водой, в которую во время отмывки попадают взвешенные частицы, способствующие процессу образования шлама в осветителях. Чтобы не нарушать процесс шламообразования в осветителе, расход регенерируемой воды должен составлять 10—12% расхода исходной воды, поступающей на осветитель (рис. 16.16). Регулятор соотношения подачи регенерируемой воды в осветитель поддерживает нужное соотношение расходов, воздействуя на подачу регенерационной воды в осветитель.

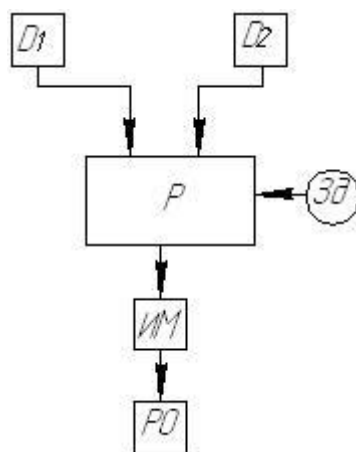


Рис. 16.16. Структурная схема регулирования расхода регенерируемой воды к осветлителю. D1 — расход регенерируемой воды в осветитель; D2 — расход исходной воды в осветитель; P — регулятор расхода; Зд — задатчик; ИМ — исполнительный механизм; РО — регулировочный орган.

Подача реагентов в исходную воду производится насосами-дозаторами. Теоретически дозировку реагентов следует регулировать по импульсу, отражающему качество обрабатываемой воды. Однако надежные дешевые и простые в эксплуатации приборы промышленность в настоящее время не выпускает. Поэтому дозировка реагентов выполняется насосом-дозатором пропорционально расходу обрабатываемой воды (рис. 16.17).

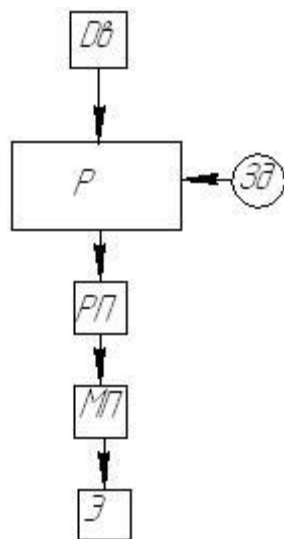


Рис. 16.17. Структурная схема регулирования дозировки реагента по расходу исходной воды. Дв — расход исходной воды; P — регулятор; Зд — задатчик; РП — промежуточное реле; МП — магнитный пускатель; Э — электродвигатель насоса-дозатора.

В осветлитель подаются известковое молоко (для снижения жесткости воды и создания кристаллических осадков), коагулянт и полиакриламид (для процесса удаления из воды грубодисперсных и коллоидных примесей). Количество подаваемого известкового молока зависит от качества обрабатываемой воды, а коагулянта и полиакриламида — от количества воды.

Поэтому предусматриваются отдельные регуляторы для дозирования указанных реагентов.

В схемах водоподготовки применяются H- и Na-катионитовые фильтры. Фильтры диаметром более 3 м поставляются комплектно с мембранными клапанами, позволяющими автоматизировать процесс восстановления фильтров.