

**Министерство образования Российской Федерации  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования**

**Северо-Западный государственный заочный технический университет**

**Кафедра теплотехники и теплоэнергетики**

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ТЭС И АЭС.  
АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК  
И СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ**

**Методические указания к выполнению лабораторных работ**

**Факультет энергетический**

**Направление и специальности подготовки дипломированного специалиста:**

**650800 – теплоэнергетика**

**100500 – тепловые электрические станции**

**100700 – промышленная теплоэнергетика**

**Санкт-Петербург**

**2004**

Утверждено редакционно-издательским советом университета  
УДК 621.311.22:681.5(075.8)

**Автоматизация энергетических установок ТЭС и АЭС. Автоматизация теплоэнергетических установок и систем теплоснабжения:** Методические указания к выполнению лабораторных работ. - СПб.: СЗТУ, 2004. – 42 с.

Методические указания соответствуют государственному образовательному стандарту высшего профессионального образования по направлению подготовки дипломированного специалиста 650800 – "Теплоэнергетика" (специальности: 100500 – "Тепловые электрические станции", 100700 – "Промышленная теплоэнергетика").

Лабораторные работы охватывают основные разделы программы по изучению объектов регулирования и звеньев автоматической системы регулирования (АСР), а также регуляторов и в целом АСР.

В методических указаниях приведено содержание работ, выполняемых на лабораторных стендах и на действующем оборудовании электростанций или котельной.

Рассмотрено на заседании кафедры теплотехники и теплоэнергетики 13 ноября 2003 г., одобрено методическим советом энергетического факультета 14 ноября 2003 г.

Рецензенты: кафедра теплотехники и теплоэнергетики Северо-Западного государственного заочного технического университета (зав. кафедрой **З.Ф. Каримов**, д-р техн. наук, проф.); **В.Д. Иванов**, канд. техн. наук, доц. кафедры теплосиловых установок и тепловых двигателей СПбГТУРП.

Составитель **Е.А. Блинов**, канд. техн. наук, доц.

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В настоящих методических указаниях представлено пять лабораторных работ, целью которых является изучение отдельных звеньев, в том числе и объектов регулирования и автоматических систем (АСР) в целом, определение параметров настройки промышленных регуляторов и исследование качества переходного процесса одной из АСР. При проведении экспериментов на действующем оборудовании в качестве промышленных объектов могут быть использованы теплоэнергетические установки ТЭС, а также промышленных и районных котельных.

Лабораторная работа 5 содержит элементы научных исследований, поэтому в выводах должен содержаться анализ выбора оптимального варианта.

При проведении лабораторных работ и обработке результатов используются показания приборов, контролирующих технологические параметры. Каждое средство измерения поверено в соответствии со своим стандартом. Методы измерений технологических параметров соответствуют государственным стандартам, например, измерение температуры измерительным устройством с магнитоэлектрическим милливольтметром соответствует ГОСТ 3044 - 74 и т.д.

К выполнению лабораторных работ допускаются студенты, сдавшие экзамен по дисциплине "Теоретические основы автоматического управления".

### *Охрана труда и техника безопасности при проведении лабораторных работ*

Лабораторные работы №№ 1 - 3 проводятся в лаборатории кафедры теплотехники и теплоэнергетики на стендах, монтаж схем и оборудования которых производился с учетом следующих ГОСТ: 12.1.019 – 79, ССБТ. "Электробезопасность"; 12.2.007.0 – 94, ССБТ. "Машины электрические вращающиеся"; 12.0.003 – 74, ССБТ. "Опасные и вредные производственные факторы".

Перед началом работ студентам необходимо пройти инструктаж по технике безопасности и правилам внутреннего распорядка в лаборатории.

Во время проведения лабораторных работ запрещается:

- собирать или производить изменения в установке под напряжением;
- подавать напряжение на установку без разрешения преподавателя;
- включать и выключать установку лицам, не назначенным для этого преподавателем;
- ходить по помещению лаборатории без разрешения преподавателя, курить и заниматься посторонними делами.

По окончании лабораторных работ необходимо:

- обесточить лабораторную установку;
- отсоединить от источника питания провода, временно подающие питание на стенд;
- привести в порядок рабочее место.

Лабораторные работы 4 и 5 проводятся на действующем оборудовании электростанции или промышленной котельной. При выполнении этих работ необходимо соблюдать следующие основные правила техники безопасности:

1. Выполнять указания руководителя о порядке передвижения по территории предприятия и внутри цехов.
2. Во время проведения лабораторных работ прикасаться к деталям оборудования (кнопкам, маховикам, рычагам, ключам управления и т.д.) разрешается только по указанию руководителя;
3. Запрещается:
  - а) вставать на ограждения, трубопроводы, конструкции и перекрытия, не предназначенные для прохода по ним и не имеющие специальных ограждений;
  - б) касаться вращающихся частей механизмов и оборудования;
  - в) находится без надобности вблизи фланцевых соединений и арматуры трубопроводов, предохранительных клапанов, а также касаться голыми руками неизолированных поверхностей трубопроводов и арматуры;
  - г) ходить по поверхностям, покрытым маслом, водой или мазутом, находиться в местах, закрытых для прохода;
  - д) курить в цехах;
  - е) во время проведения опытов отлучаться от рабочего места.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Ключев А.С. Автоматическое регулирование. – М.: Энергия, 1973. – 392 с.
2. Плетнев Г.П. Автоматизированные системы управления объектами тепловых электростанций. – М.: Изд-во МЭИ, 1995. – 352 с.
3. Иванов Ю.П. Теоретические основы автоматического управления тепловыми процессами. – Л.: СЗПИ, 1982. – 80 с.
4. Стефани Е.П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. – М.: Энергия, 1972. – 376 с.
5. Электронные регулирующие приборы серии РПНБ. – М.: МЗТА, 1968.- 184 с.

# Работа 1. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА (ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ) КАК ИНЕРЦИОННОГО ЗВЕНА В АСР

## I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение динамических свойств чувствительного элемента - термоэлектрического преобразователя - и его статических характеристик; определение коэффициента передачи и исследование инерционности.

## II. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Элементы измерительных устройств, преобразующие измеряемую величину, в частности температуру, в величину, удобную для дальнейшего использования в качестве входной величины элемента сравнения автоматического регулятора, называются чувствительными элементами АСР или измерительными преобразователями. Чувствительный элемент характеризуется чувствительностью  $k_{чэ}$  и постоянной времени  $T_{чэ}$ .

Чувствительность термоэлектрического преобразователя (ТП) определяется его статической характеристикой, т. е. зависимостью выходной величины  $x_{\text{ВЫХ}}$  от входной  $x_{\text{ВХ}}$  - температуры  $\theta$  - в установившемся тепловом состоянии. В случае нелинейной статической характеристики чувствительность может быть определена из выражения

$$k_{чэ} = dx_{\text{ВЫХ}} / dx_{\text{ВХ}} \cdot \quad (1)$$

Для линейной или линеаризованной статической характеристики чувствительность элемента, в данном случае ТП, может быть определена из следующего выражения:

$$k_{чэ} = \Delta x_{\text{ВЫХ}} / \Delta x_{\text{ВХ}} = \Delta x_{\text{ВЫХ}} / \Delta \theta. \quad (2)$$

Здесь чувствительность элемента принято называть коэффициентом передачи или коэффициентом усиления.

В нестационарных тепловых процессах температура чувствительного элемента ТП вследствие его инерционности отстает от температуры регулируемой среды. Тепловая инерционность чувствительного элемента характеризуется постоянной времени  $T_{чэ}$ .

Постоянная времени чувствительного элемента  $T_{\text{чэ}}$  в свою очередь зависит от его конструкции, теплоемкости материала и от условий теплообмена между его поверхностью и контролируемой средой. Передаточная функция чувствительного элемента - термоэлектрического преобразователя имеет следующий вид:

$$W(p) = k_{\text{чэ}} / (Tp + 1). \quad (3)$$

Такая передаточная функция характеризует элемент как инерционное или аperiodическое звено первого порядка. Ниже приводится аналитическое определение инерционности термоэлектрического преобразователя. Если считать термоэлектрический преобразователь объектом с сосредоточенными параметрами, то количество теплоты, переходящее от окружающей среды (с теплоемкостью много большей теплоемкости погруженного в нее чувствительного элемента) к материалу термоэлектрического преобразователя, может быть описано уравнением Ньютона:

$$\frac{dQ}{d\tau} = \frac{\lambda}{S} F(t - \theta), \quad (4)$$

где  $Q$  - количество теплоты;  $\tau$  - время;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности;  $S$ —толщина стенки чувствительного элемента;  $F$ —внешняя поверхность чувствительного элемента;  $t$ - текущая температура среды;  $\theta$ —текущая температура чувствительного элемента.

Количество теплоты, аккумулируемое чувствительным элементом, может быть определено из уравнения

$$Q = cV\gamma\theta, \quad (5)$$

где  $c$  - средняя удельная теплоемкость материала чувствительного элемента;  $V$ - объем чувствительного элемента;  $\gamma$ - удельный вес материала чувствительного элемента.

Продифференцировав уравнение (5) во времени, получим

$$\frac{dQ}{d\tau} = cV\gamma \frac{d\theta}{d\tau}. \quad (6)$$

Приравняем правые части уравнений (4) и (6)

$$\frac{\lambda}{S} F(t - \theta) = cV\gamma \frac{d\theta}{d\tau}. \quad (7)$$

Разделим уравнение (7) на выражение  $(\lambda F/S)$ , тогда

$$(t - \theta) = \frac{cV\gamma}{\frac{\lambda}{S} F} \cdot \frac{d\theta}{d\tau}. \quad (8)$$

В уравнении (8) коэффициент при производной есть величина постоянная, называемая постоянной времени чувствительного элемента:

$$T_{\text{чэ}} = \frac{cV\gamma}{\frac{\lambda}{S} F}. \quad (9)$$

Подставив значение  $T_{\text{чэ}}$  в уравнение (8), получим дифференциальное уравнение 1-го порядка

$$T_{\text{чэ}} (d\theta / d\tau) + \theta = t. \quad (10)$$

Принимая значение  $t$  за  $x_{\text{вх}}$  с учетом коэффициента передачи, полученного из статической характеристики, запишем уравнение динамики чувствительного элемента - термоэлектрического преобразователя - в следующем виде:

$$T_{\text{чэ}} (dx_{\text{вых}} / d\tau) + x_{\text{вых}} = k_{\text{чэ}} x_{\text{вх}}, \quad (11)$$

или в операторной форме

$$T_{\text{чэ}} p x_{\text{вых}} + x_{\text{вых}} = k_{\text{чэ}} x_{\text{вх}}.$$

Тогда передаточная функция чувствительного элемента - термоэлектрического преобразователя — будет иметь вид

$$W(p) = k_{\text{чэ}} / (T_{\text{чэ}}p + 1). \quad (12)$$

Правильный выбор конструктивных и теплотехнических характеристик ТП, места и способа его установки, а также полное представление о процессах теплообмена между контролируемой средой и чувствительным элементом при нарушении стационарных режимов позволяет обеспечить высокое качество процесса регулирования.

### III. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка (рис. 1) состоит из печи сопротивления 3, используемой в качестве теплового объекта, вольтметра 2, контролирующего напряжение в печи, реостата 1, позволяющего изменять напряжение в печи, исследуемого чувствительного элемента - термоэлектрического преобразователя 4 и контрольного потенциометра 5 типа ПП-63.

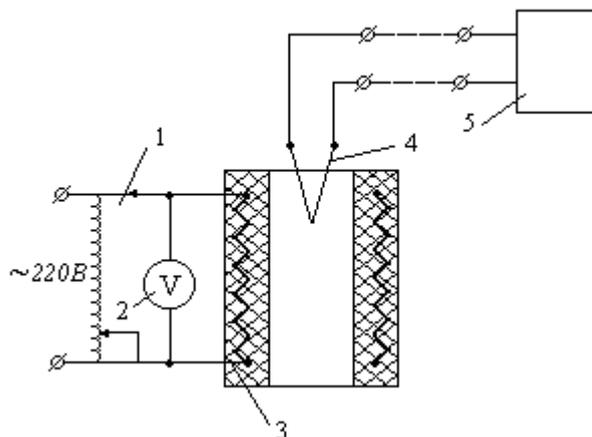


Рис. 1

### IV. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему лабораторной установки для исследования динамических свойств термоэлектрического преобразователя (см. рис. 1).

2. Для приборов и преобразователей необходимо записать их тип, класс точности, диапазон измерения или преобразования, условия измерения или преобразования (температуру окружающей среды, давление, влажность, наличие электрических, магнитных, вибрационных полей). Для оборудования - наименование, тип или марку, основные технические характеристики, специальные условия использования.

3. Записать показания приборов до подачи напряжения к печи в таблицу по форме 1.

Время $\tau$ , с	
Напряжение по вольтметру $U$ , В	
ТермоЭДС по потенциометру $E$ , мВ	
Температура (по градуировочной таблице) $\theta$ , °С	

4. Установить реостат 1 на наибольшую величину сопротивления и включить питание печи.

5. Уменьшая сопротивление реостата 1 (8 ... 10 точек), повышать температуру в печи, фиксируя показания вольтметра и потенциометра в таблице по форме 1. При переходе с одного температурного режима на другой перед снятием показаний с приборов необходимо делать выдержку в течение 5 ... 10 мин с целью завершения переходного процесса в печи.

6. Показания потенциометра, выраженные в милливольтгах, перевести в градусы, используя градуировочную таблицу термоэлектрического преобразователя.

7. Построить зависимости:  $\theta = f(U)$ ;  $E = f(\theta)$ .

8. Определить инерционность термоэлектрического преобразователя двумя методами:

- а) аналитически - по формулам, приведенным в разделе II;
- б) экспериментально.

Экспериментальное определение инерционности производится в следующем порядке: при установившемся тепловом состоянии печи и термоэлектрического преобразователя ( $d\theta/d\tau = 0$  и  $dE/d\tau = 0$ ) последний быстро извлекается из печи и охлаждается на спокойном воздухе. Измерение термоЭДС термоэлектрического преобразователя в различные моменты времени охлаждения производится с помощью потенциометра. Секундомер включается (начальный момент опыта) одновременно с извлечением из печи преобразователя, а отключается в момент, когда показание потенциометра будет соответствовать начальной температуре печи (показание, снятое в п. 3). Промежуточные моменты времени между началом и концом опыта отсчитываются через 2 ... 4 мВ по показаниям потенциометра.

Результаты эксперимента занести в таблицу по форме 2.

9. По данным таблицы (форма 2) построить кривую разгона термоэлектрического преобразователя  $x_{\text{ВЫХ}} = f(\tau)$ , являющуюся его динамической характеристикой.

10. Определить постоянную времени  $T_{\text{ЧЗ}}$ , для этого провести касательную в точке максимальной скорости изменения кривой переходного процесса до линии установившегося значения выходной величины  $x_{\text{ВЫХ уст}}$ , как показано на рис. 2. Значение проекции касательной на линию  $x_{\text{ВЫХ уст}}$  будет определять приближенно постоянную времени  $T_{\text{ЧЗ}}$ , с.

Время $\tau$ , с	
ТермоЭДС по потенциометру E, мВ	
Температура (по градуировочной таблице) $\theta$ , °С	

11. Уточнить полученное значение постоянной времени, используя свойства кривой,

$$x_{\text{вых}} = 0,63x_{\text{вых уст}} \text{ при } \tau = T_{\text{чз}}.$$

12. Определить длительность переходного процесса на уровне 0,99 и 0,95 от установившегося значения.

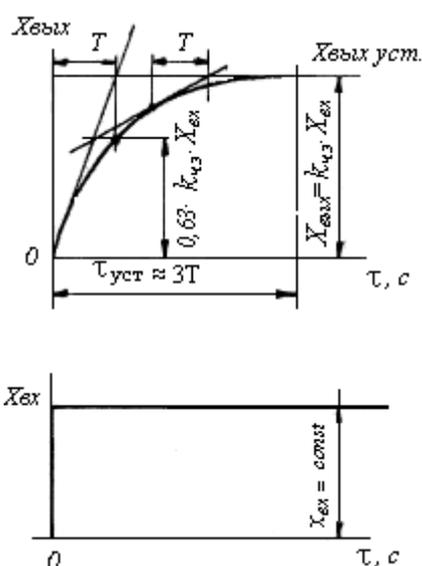


Рис. 2

## V. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Схема лабораторной установки и ее описание.
2. Технические характеристики используемого в работе оборудования и метрологические характеристики средств измерений.
3. Таблицы с результатами опытов, аналитические расчеты, графики.
4. Выводы по работе.

Литература: [1], с. 20... 23.

## Работа 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИФМАНОМЕТРА КАК БЕЗЫНЕРЦИОННОГО ЗВЕНА В АСР

### I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение статических и динамических характеристик дифманометра типа ДМ с дифференциально-трансформаторным преобразователем; овладение навыками настройки «на процесс» дифманометра типа ДМ как звена в автоматической системе регулирования.

### II. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Дифманометры типа ДМ широко применяются для измерений расходов, перепадов давления, избыточного и вакуумметрического давлений жидких, паровых и газовых сред, для измерений уровня жидкостей и пароводяной смеси.

Они служат для преобразования измеряемой величины  $x_{вх}$  (перепада давлений, избыточного или вакуумметрического давления) в электрический сигнал  $x_{вых}$ , который может быть передан дистанционно на измерительный прибор дифференциально-трансформаторной системы КПД1, КВД1, КСД1, КСД2 или КСД3, на регулятор или управляющую вычислительную машину.

Дифманометр типа ДМ как звено в АСР может быть представлен в виде двух последовательно соединенных звеньев: 1) измерительного преобразователя давления с передаточной функцией  $W_1(p)$  и 2) дифференциально-трансформаторного преобразователя с передаточной функцией  $W_2(p)$ . Передаточная функция дифманометра в целом может быть записана в виде

$$W(p) = W_1(p)W_2(p). \quad (13)$$

При описании поведения измерительных преобразователей давления следует учитывать как временную, так и пространственные координаты мембраны преобразователя.

В этом случае уравнение движения измерительного преобразователя давления с круглой мембраной имеет вид

$$\frac{1}{\lambda_0} \left[ \frac{\partial^2 \ell(r; \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \ell(r; \tau)}{\partial r} \right] + p(\tau) = k_1 \frac{\partial \ell(r; \tau)}{\partial r} + \rho_s \frac{\partial^2 \ell(r; \tau)}{\partial r^2}, \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \ell(r; \tau)|_{r=R} = 0; \\ \text{при} & \quad \ell(r; \tau)|_{\tau=0} = \ell_0; \\ & \ell'(r; \tau)|_{\tau=0} = \ell'_0, \end{aligned}$$

где  $\lambda_0$  - величина, характеризующая материал, из которого изготовлена мембрана, а также ее упругость и натяжение;  $r$  - расстояние от центра мембраны до данной точки;  $R$  - радиус мембраны;  $l(r; \tau)$  - мгновенное значение отклонения точки мембраны с координатой  $r$  от нулевого положения;  $l_0$  и  $l'_0$  - постоянные величины;  $k_1$  и  $\rho_s$  - коэффициент демпфирования и масса единицы поверхности мембраны;  $P(\tau)$  - текущее значение давления (перепада давлений);  $\tau$  - текущее значение времени переходного процесса.

На практике выходной величиной измерительного преобразователя давления считают отклонение центра мембраны, иначе - линейное перемещение сердечника дифференциально-трансформаторного преобразователя, т. е.  $x_{\text{вых1}} \equiv x_{\text{вых2}}$ . В этом случае  $r=0$ , а уравнение движения измерительного преобразователя давления будет иметь вид

$$m \frac{d^2 l(\tau)}{d\tau^2} + k_1 \frac{dl(\tau)}{d\tau} + c_1 l(\tau) = P(\tau) \quad (15)$$

$$\text{при } l(0) = l_0; l'(0) = l'_0,$$

где  $m$ —масса мембраны;  $c_1$  - жесткость мембраны.

Исследования показали, что при мгновенном (скачкообразном или импульсном) изменении значения  $x_{\text{вх}}$  уравнения (14) и (15) имеют комплексные корни, т. е. при данном характере входного воздействия мы имеем колебательный тип переходной характеристики измерительного преобразователя.

В реальных условиях эксплуатации теплоэнергетического оборудования скорость изменения давления или перепада давлений в объекте соизмерима со скоростью перемещения мембраны, определяемой ее жесткостью, коэффициент демпфирования и масса мембраны оказывают исчезающе малое влияние на характер движения мембраны, и уравнение движения (15) преобразователя приобретает вид

$$c_1 l(\tau) = P(\tau)$$

или

$$c_1 \Delta l = \Delta P, \quad (16)$$

так как  $k = x_{\text{ВЫХ}} / x_{\text{ВХ}}$ , для измерительного преобразователя давления  $x_{\text{ВХ}} = \Delta P$ , а  $x_{\text{ВЫХ}} = \Delta l$ , то, используя (16), запишем передаточную функцию его в виде

$$W_1(p) = \Delta l / \Delta P = 1/c_1 = k_1. \quad (17)$$

Дифференциально-трансформаторный преобразователь (ДТП) состоит из ферромагнитного сердечника, связанного штоком с центром мембраны, и двух обмоток - первичной и вторичной. Вторичная обмотка состоит из двух равных частей, намотанных встречно.

Магнитный поток, наводимый в сердечнике первичной обмоткой, равен

$$\Phi = B \cdot S = \frac{I\omega}{\frac{1}{\mu_c \mu_0} \cdot \frac{l_c}{S}}, \quad (18)$$

где  $B$  - магнитная индукция;  $S$  - площадь сердечника;  $I$  - ток в первичной обмотке;  $\mu_c$  - магнитная проницаемость сердечника;  $\mu_0$  - магнитная постоянная;  $l_c$  - длина сердечника;  $\omega$  - число витков обмотки.

Ток, индуцируемый в первой и второй частях вторичной обмотки, соответственно будет:

$$I_1 = \frac{\Phi \cdot \frac{1}{\mu_s \cdot \mu_0} \cdot \frac{l_{c1}}{S}}{\omega_1}; \quad I_2 = \frac{\Phi \cdot \frac{1}{\mu_s \cdot \mu_0} \cdot \frac{l_{c2}}{S}}{\omega_2} \quad (19)$$

где  $n$  - коэффициент, характеризующий ту часть магнитного потока, которая пронизывает вторичную обмотку (в данной работе  $n=2$ ). При отклонении сердечника от положения равновесия, при котором ЭДС, индуцируемые в обеих частях вторичной обмотки, равны друг другу, на вторичной обмотке возникает сигнал

$$U_{\text{ВЫХ}} = E_1 - E_2 = I_1\omega_1 - I_2\omega_2, \quad (20)$$

отсюда, с учетом (19),

$$U_{\text{ВЫХ}} = k_2(l_{c1} - l_{c2}) = k_2\Delta l_c, \quad (21)$$

$$\text{где } k_2 = \frac{\Phi}{n} \cdot \frac{1}{\mu_c \mu_0} \cdot \frac{1}{S}.$$

При  $x_{\text{ВЫХ}2} \equiv U_{\text{ВЫХ}}$  и  $x_{\text{ВХ}2} \equiv x_{\text{ВЫХ}1} = \Delta l_c$   $k_2 = U_{\text{ВЫХ}} / \Delta l_c$ , а передаточная функция дифференциально-трансформаторного преобразователя

$$W_2(p) = k_2. \quad (22)$$

Подставив (17) и (22) в (13), получим передаточную функцию дифманометра типа ДМ

$$W(p) = k_1 k_2 = k, \quad (23)$$

т. е. в определенных условиях дифманометр типа ДМ представляет собой безынерционное усилительное звено.

### III. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка представляет собой стенд для снятия характеристик мембранных дифманометров, являющихся индуктивными, дифференциально-трансформаторными или ферродинамическими датчиками в системе автоматического регулирования.

Схема лабораторной установки для исследования дифманометра типа ДМ с дифференциально-трансформаторным датчиком представлена на рис. 3. В качестве исследуемого дифманометра используется дифманометр типа ДМ 6, плюсовой штуцер которого соединен с плюсовым штуцером контрольного дифманометра типа ДТ 4 и воздушным насосом 5. Минусовые штуцера дифманометров ДМ и ДТ сообщаются с атмосферой. Контроль величины давления в системе осуществляется с помощью образцового манометра 3 типа МО. Электрическим измерителем перепада давления в дифманометре служит система, состоящая из электронного прибора 7 типа РПИБ, задатчика 2 типа ЗРУ-24 и электронного лампового вольтметра 8 типа ВК-7-10А/1. Питание системы осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В через стабилизатор 1.

При сбалансированных электронном и измерительном блоках прибора типа РПИБ и наличии сигнала от задатчика 2, измерительный блок прибора РПИБ выдает сигнал, пропорциональный перемещению мембраны дифманометра ДМ, на ламповый вольтметр 8, которым фиксируются показания в милливольтгах.

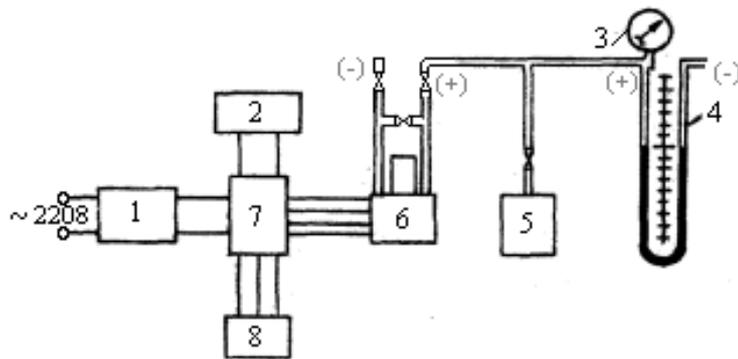


Рис. 3

#### IV. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему лабораторной установки в соответствии с рис. 3.
2. Снять технические и метрологические характеристики используемых в работе основных приборов и устройств.
3. Снять статическую характеристику преобразователя ДМ-40 и определить его коэффициент передачи при измерении избыточного давления среды, для этого:
  - а) сбалансировать электронный блок прибора типа РПИБ-III: все рукоятки выставить на «0», ручкой «Корректор» РПИ добиться погасания сигнальных ламп;
  - б) задатчиком установить задание 50%;
  - в) ввести задание ручкой «Чувствительность ЗД»;
  - г) подать сигнал от датчика ручкой «Чувствительность I»;
  - д) ручкой «Корректор И-III» сбалансировать измерительный блок (измерительный блок считается сбалансированным, если сигнальные лампы не горят);
  - е) открыть вентили «+», «—» и уравнивательные у приборов ДМ-40 и ДТ-50; по истечении 5 мин уравнивательные вентили закрыть;
  - ж) добиться нулевых значений на ламповом вольтметре ( $U''=0$ ) при атмосферном давлении, перемещая сердечник датчика до тех пор, пока не погаснут сигнальные лампы на приборе РПИБ-III, а на шкале лампового вольтметра не появятся нулевые значения;
  - з) поднять давление в системе с помощью воздушного насоса через каждые 490,5 Па (50 мм вод. ст.) до значения  $P=4905$  Па (500 мм вод. ст.). Показания приборов занести в таблицу по форме 3;

Показания контрольного дифманометра ДТ-50 Р, Па	490,5	981,0	1471,5	1962	2452,5	2943	3433,5	3924	4414,5	4905
Показания образцового манометра МО, Па										
Показания лампового вольтметра ВК7-10А/1 U", мВ										

и) сбросить давление в системе открытием уравнивающих вентиляей;

к) построить статическую характеристику в виде зависимости

$$U'' = f(p);$$

л) определить коэффициент передачи чувствительного элемента датчика

$$k_{чз} = \Delta U'' / \Delta P.$$

4. Снять статическую характеристику преобразователя ДМ-40 и определить его коэффициент передачи при измерении перепада давлений и уровня среды, для этого:

а) сбалансировать электронный и измерительный блоки прибора

РПИБ-III по методике, изложенной в п. 3 (а, б, в, г, д);

б) открыть вентили «+», «—» и уравнивающие у ДМ-40 и ДТ-50, затем по истечении 5 мин уравнивающие вентили закрыть;

в) установить в системе регулируемый перепад давлений (по указанию преподавателя); это будет, в свою очередь, одновременно характеризовать регулируемый уровень жидкости  $H$ , если регулированию подлежит не перепад давлений, как в настоящей работе, а уровень;

г) добиться нулевых значений вольтметра ( $U'' = 0$ ) при постоянном заданном значении  $\Delta P$ , перемещая сердечник преобразователя ДМ-40 до тех пор, пока не погаснут сигнальные лампы на регуляторе РПИБ-III, а на шкале вольтметра не появятся нулевые значения;

д) снять статическую характеристику датчика ДМ-40, при этом значения  $\Delta P' > \Delta P$  считать положительными; значения  $\Delta P'' < \Delta P$  - отрицательными;  $\Delta P$  принять на графике равным нулю;  $U'' > 0$  для  $\Delta P'$ ;  $U'' < 0$  для  $\Delta P''$ .

Считать  $\Delta P'_{\text{кон}} = + 2452,5$  Па (250 мм вод. ст.);  $\Delta P''_{\text{кон}} = -2452,2$  Па (250 мм вод. ст.).

Показания приборов занести в таблицу по форме 4;

е) построить графическую зависимость  $U'' = f(\Delta P)$ ;

ж) определить коэффициент передачи датчика

$$k = \Delta U'' / \Delta(\Delta P).$$

Показания контрольного дифманометра, Па	$\Delta P'$	
	$\Delta P''$	
Показания образцового манометра МО, Па	$\Delta P'$	
	$\Delta P''$	
Показания вольтметра ВК7-10А/1 $U''$ , мВ	$\Delta P'$	
	$\Delta P''$	

5. Определить коэффициент передачи датчика аналитическим методом, используя уравнения, приведенные в разделе «Основные теоретические положения».

## V. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Схема лабораторной установки.
  2. Технические и метрологические характеристики приборов и устройств.
  3. Результаты экспериментов, аналитических расчетов, графики.
  4. Выводы по работе.
- Литература: [1], с. 30...32; [3], с. 35 ... 38.

## Работа 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОБЪЕКТЕ

### I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Овладение навыками синтеза и анализа автоматических систем регулирования, исследование переходных процессов.

### II. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

#### 1. *Определение закона регулирования*

Решая задачу автоматизации любого объекта, называемого объектом регулирования (ОР), на первом этапе необходимо определить те закономерности изменения регулируемого параметра во время переходного

процесса, используя которые можно с максимальной эффективностью управлять объектом, т. е. найти закон регулирования.

Определение закона регулирования производится по известной инженерной методике (см., например, Климовицкий Н. Д., Копелович А. П. Автоматический контроль и регулирование в черной металлургии. - М.: Металлургия, 1967. - 787 с.) на основе динамических и статических параметров ОР: запаздывания  $\tau$  постоянной времени  $T$ , скорости разгона (чувствительности) объекта  $\varepsilon$ , коэффициента передачи  $k$  и степени самовыравнивания  $\rho$ . Эти параметры можно определить по кривой разгона, импульсной или частотной характеристикам.

При исследовании большинства теплоэнергетических объектов достаточно иметь кривую разгона - кривую изменения во времени выходной величины  $x_{\text{вых}}$  (регулируемого параметра) в переходном процессе, вызванном однократным скачкообразным возмущением входной величины.

Большинство объектов теплоэнергетики обладают свойством самовыравнивания; примерный вид кривой разгона этих объектов представлен на рис. 4.



Рис. 4

Для определения искомых параметров необходимо найти точку перегиба  $M$  кривой, которая характеризует максимальную скорость изменения регулируемого параметра, т. е.  $\text{tg } \alpha = \max$ .

Через ( $\cdot$ )  $M$  следует провести касательную к кривой разгона до пересечения с линиями первоначального и нового установившихся положений и по графику (рис. 4) определить общее запаздывание  $\tau$ , условную постоянную времени  $T$  и коэффициент передачи  $k$  объекта.

Условная постоянная времени  $T$ , называемая далее постоянной времени, имеет следующий физический смысл: это время, в течение которого выходная величина  $x_{\text{вых}}$  изменится от первоначального установившегося значения до нового при условии, что скорость изменения  $x_{\text{вых}}$  максимальна и постоянна, т. е.

$$dx_{\text{ВЫХ}} / d\tau = \max; dx_{\text{ВЫХ}} / d\tau = \text{const}.$$

Физический смысл коэффициента передачи  $k$ : приращение выходной величины ( $\Delta x_{\text{ВЫХ}} = x_{\text{ВЫХ}2} - x_{\text{ВЫХ}1}$ ) при изменении  $x_{\text{ВЫХ}}$  от первоначального установившегося значения до нового при единичном скачкообразном возмущении на входе.

Вместо единичного скачкообразного возмущения на практике принимают возмущение, соответствующее одному проценту хода регулирующего органа (РО). Однако при снятии кривых разгона теплоэнергетических объектов, обладающих значительным коэффициентом емкости, входное возмущение, соответствующее 1% хода РО, не приведет к сколько-нибудь заметному изменению  $x_{\text{ВЫХ}}$ . Поэтому в реальных условиях исследований на вход РО подается возмущение  $\Delta x_{\text{ВЫХ}}$ , соответствующее (15 ... 20)% хода РО. В этом случае коэффициент передачи определяется в соответствии с выражением

$$k = \Delta x_{\text{ВЫХ}} / \Delta x_{\text{ВХ}}, \quad (24)$$

где  $\Delta x_{\text{ВЫХ}}$  выражено в единицах регулируемого параметра, а  $\Delta x_{\text{ВХ}}$  выражается в процентах хода регулирующего органа.

Степень самовыравнивания

$$\rho = 1/k, \quad (25)$$

скорость разгона (чувствительность) объекта

$$\varepsilon = 1/(\rho T). \quad (26)$$

## 2. Синтез АСР

Зная закон регулирования, свойства объекта регулирования и задачи регулирования, выбирается типовая схема АСР, подобная, например, представленной на рис. 5.

Чувствительный элемент (ЧЭ), получая изменившийся сигнал  $x_{\text{ВЫХ}}$  с объекта РО, преобразует его и передает на суммирующую схему регулятора, где сравнивается с сигналом задания  $f(\tau)$ ; сигнал разбаланса той или иной фазы, пройдя усилительные каскады регулятора, поступает на фазочувствительный усилитель (УЭ); усиленный сигнал разбаланса поступает на исполнительный механизм ИМ, который перемещает регулирующий орган РО в сторону открытия или закрытия, увеличивая или уменьшая количество подаваемой в объект энергии или вещества  $x_{\text{ВХ}}$ .

Помимо перечисленных элементов в схеме АСР необходимо предусмотреть наличие переключателя работ «Автомат - Дистанционно», ключ ручного управления «Убавить - Прибавить», указатель положения (УП) регулирующего органа, а также измерительные приборы для контроля входных и выходных параметров.

В конечном счете самые сложные АСР с многими внутренними и перекрестными связями представляют собой набор типовых схем, подобных представленной на рис.5, и корректирующих звеньев, включенных в схему.

В зависимости от конкретных условий работы проектируемой АСР выбирается вид энергии, используя которую будут работать ее элементы и система в целом: пневматическая, электрическая, гидравлическая и т. д.

Следующий этап - выбор конкретных звеньев АСР.

Зная вид энергии, на которой будет работать регулятор, род сигнала, который будет поступать на суммирующую схему регулятора, выбирается регулятор, который позволяет сформировать найденный ранее закон регулирования.

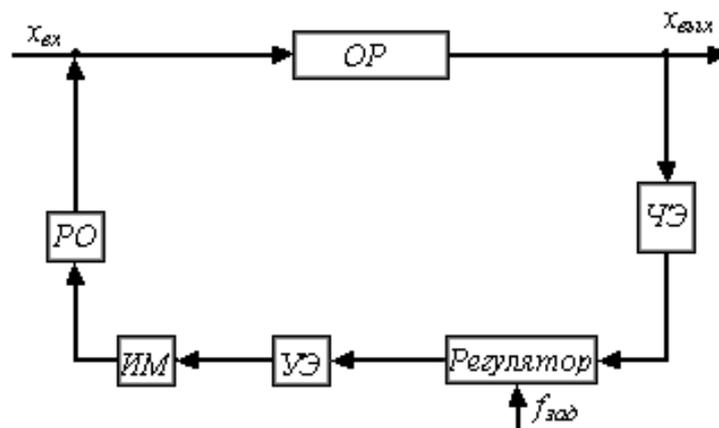


Рис. 5

Например, если вид энергии – переменный ток промышленной частоты, род сигнала, поступающего на суммирующую схему регулятора, - постоянный ток, а закон, по которому необходимо регулировать выходной параметр объекта, - пропорционально-интегральный, то можно выбрать ПИ-регулятор типов РПИБ (РПИБ-Т, РПИБ-С), Р21, Р12, РБА, РБИ и т. п.; при том же ПИ-законе регулирования, но для пневматической АСР - регуляторы типа ПР3.21, ПР3.31 и т. д. Задатчик к регулятору выбирается в соответствии с видом энергии, на которой работает регулятор, и представляет собой один из элементов его суммирующей схемы.

Очень важное значение для качественной работы АСР имеет правильный выбор чувствительного элемента и регулирующего органа. Чувствительный элемент следует выбирать, исходя из следующих основных положений: возможность работы ЧЭ в рабочем диапазоне регулируемого параметра  $x_{\text{вых}}$ , линейность статической характеристики ЧЭ в рабочем диапазоне; согласованность выходного сигнала ЧЭ и входного сигнала регулятора

(например, оба сигнала постоянного тока, переменного тока, пневматические и т. д.); соответствие динамических свойств ЧЭ динамическим свойствам ОР и задачам регулирования (например, при «грубом» регулировании медленно изменяющегося во время переходных процессов параметра следует выбирать ЧЭ средней инерционности или даже инерционный; при «точном» регулировании быстро меняющегося параметра - малоинерционный ЧЭ). Конкретная конструкция регулирующего органа рассчитывается и выбирается в соответствии с условиями эксплуатации. Одно из важнейших условий при этом - правильно рассчитать статическую характеристику - зависимость выходной величины от входной при установившихся значениях их. Статическая характеристика РО должна строго соответствовать статической характеристике объекта регулирования, так как РО должен обеспечить подачу вещества или энергии в объект в соответствии с характером и рабочим диапазоном изменения  $x_{\text{вых}}$  объекта; при этом статическая характеристика РО должна учитывать статические свойства всех звеньев, входящих в АСР. Расчет желаемой статической характеристики РО может быть произведен по методике, изложенной, например, в книге Иващенко Н. Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. - М.: Машгиз, 1962. - 495 с.

Определение статической характеристики уже выбранного РО показано ниже на конкретном примере. Пусть регулирующий орган (автотрансформатор) изменяет подаваемое в объект регулирования (нагревательная электропечь) количество тепловой энергии  $Q$ . Положение движка автотрансформатора фиксируется указателем положения УП регулирующего органа от 0 до 100%. Количество теплоты  $Q$ , подаваемой в ОР при любом положении РО, может быть определено по значению выходного напряжения автотрансформатора

$$Q = 0,24I^2 R \tau = 0,24(U^2 / R) \tau, \quad (27)$$

где  $I$  - ток нагрузки;  $R$  - сопротивление электропечи;  $U$  и  $U_{\text{max}}$  - текущее и максимальное значения напряжения в электрической печи;  $\tau$  - время, а относительное количество теплоты, подводимой к объекту, можно определить из выражения

$$v = Q / Q_{\text{max}} = U^2 / U_{\text{max}}^2, \quad (28)$$

Таким образом, каждому положению РО  $n_{\text{УП}}$  (показание УП в процентах хода РО), т. е. каждой входной величине, в установившемся состоянии соответствует определенное значение подаваемой в объект теплоты  $v$ , т. е. выходная величина; зависимость между ними (рис. 6) представляет собой статическую характеристику РО. Точки 1 и 2 определяют рабочий участок, т. е. такой участок, за пределы которого не выходит регулируемый параметр в процессе эксплуатации объекта.

Соединив точки 1 и 2 прямой, получим линеаризованную статическую характеристику, по которой может быть определен коэффициент передачи  $k_{PO}$  в соответствии с выражением (24):

$$k_{PO} = \Delta v / \Delta n_{уп} \quad (29)$$

Исполнительный механизм (гидравлический, пневматический или электрический) выбирается в соответствии с законом регулирования, исходя из условий эксплуатации, а усилительный элемент (электрический, пневматический, гидравлический или комбинированный) - в зависимости от выбранного ИМ.

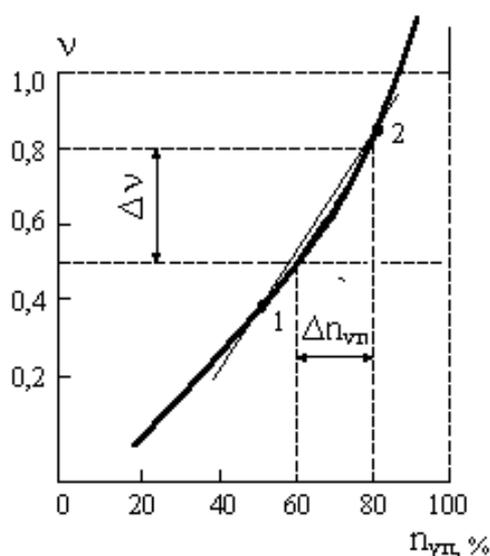


Рис. 6

Ключи управления и переключатели (станция управления), приборы технологического контроля выбираются, исходя из вида используемой для работы АСР энергии, систем принятой аппаратуры управления (РПИБ, КАСКАД, АКЭСР, СТАРТ и т. д.).

### 3. Настройка регулятора и АСР

Целью настройки является обеспечение наиболее выгодного переходного процесса регулирования. Наиболее сложным и ответственным является статическая и динамическая настройка регулятора.

Статическая настройка регулятора складывается из двух операций: 1) настройка регулятора на процесс, т. е. настройка измерительного блока регулятора на заданное значение регулируемого параметра и выбор требуемых диапазона действия и цены деления задатчика, рассматриваемого как один из

элементов суммирующей схемы регулятора; 2) настройка на наименьшую статическую погрешность электронного блока и зоны нечувствительности измерительного блока регулятора.

Например, для регулятора типа РПИБ-Т рабочий диапазон регулируемых температур устанавливается при помощи сменных резисторов R52 и R53 (см. [5]); для изменения диапазона действия задатчика предназначен сменный резистор R51 (шунт задатчика), Ом [5].

$$R51 = 13,6D / (55,5 - D), \quad (30)$$

где  $D$  — необходимый диапазон задатчика, мВ.  
Обратная формула

$$D = \frac{55,5}{1 + \frac{13,6}{R51}}, \quad (31)$$

цена деления задатчика равна, мВ,

$$Z = D / 50. \quad (32)$$

Динамическая настройка регулятора производится по одной из инженерных методик, например методике ВТИ им. Ф. Э. Дзержинского (см. книгу: Электронные регулирующие приборы серии РПИБ / Инструкция по лабораторной проверке, монтажу и эксплуатации. - М.: ЦБТИМС, 1967. - 184 с.). Основными параметрами динамической настройки регулятора в зависимости от найденного закона регулирования могут быть коэффициент пропорциональности  $k$ , время издрорма  $T_{и}$  время предварения  $T_{пр}$  и др. Так, регулятор с упругой обратной связью (издрормный регулятор) имеет два параметра динамической настройки: скорость обратной связи  $v_{oc}$  [мВ/с] и время издрорма  $T_{и}$  [с], которые могут быть приближенно определены по формулам:

$$\begin{aligned} \text{для} \quad \varepsilon\tau &= 0,0 \dots 0,02 & (33) \\ V_{oc} &= \varepsilon\tau S_n; \quad T_{и} = 3,3\tau; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{для} \quad 0,02 < \varepsilon\tau < 1,5 & (34) \\ V_{oc} &= \frac{2,6nS}{\rho} \cdot \frac{\varepsilon\tau - 0,08}{\varepsilon\tau + 0,6}; \quad T_{и} = \frac{0,8}{\varepsilon\tau} \tau; \end{aligned}$$

$$\text{для} \quad \varepsilon\tau > 1,5 \quad (35)$$

$$V_{oc} = \frac{2nS}{\rho}; \quad T_{и} = 0,6\tau,$$

где  $\varepsilon$ ,  $\rho$ ,  $\tau$  - параметры объекта регулирования, найденные, как это показано в п.1 настоящего раздела;  $n$  - коэффициент чувствительности измерительного блока;  $S$  - скорость регулирования, ед. рег. пар/с.

Для достижения расчетного времени издрома  $T_{и}$  устанавливается определенное сопротивление переменного резистора. Например, на регуляторе серии РПИБ - это сменный резистор R9 [5], значение которого находится из выражения

$$R9 = T_{и} / C_3, \quad (36)$$

здесь размерность  $T_{и}$  - секунды,  $C_3$ —мкФ,  $R9$ —МОм.

Для получения расчетной скорости обратной связи  $v_{oc}$  на регуляторах этой серии устанавливаются сменный резистор R13 и переменный резистор R14 [5]. Зависимость скорости связи от положения ручки «Скорость связи» (R14) для различных значений сменного резистора R13 «Диапазон скорости связи» определяется по графику [5].

Характер действия упругой обратной связи показан на рис. 7.

Иногда при настройке регулятора требуется знать скорость перемещения регулирующего органа

$$v_{PO} = n_{yII} / \Delta\tau, \quad (37)$$

где  $n_{yII}$  - число оцифрованных делений указателя положения;  $\Delta\tau$  - время, в течение которого РО переместится от одного крайнего положения до другого, с.

Настройка АСР в целом заключается в настройке регулятора, ИМ, РО и УП на рабочий диапазон регулирования.

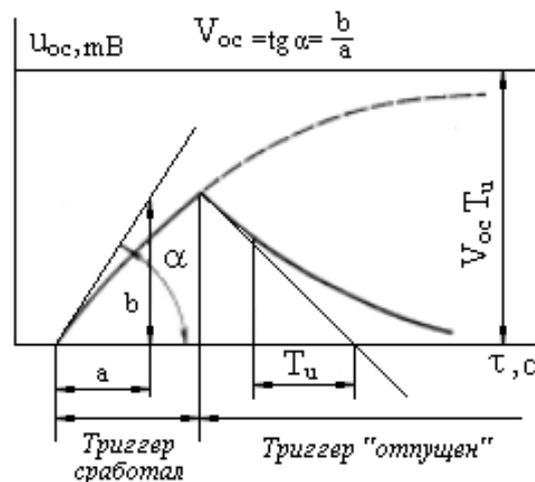


Рис. 7

#### 4. Анализ АСР

Данный этап является заключительным, так как только исследование процессов регулирования разработанной АСР дает полное представление о качестве проделанной работы, о том, насколько экономически эффективной является предложенная АСР и выбранные параметры настройки.

При этом экспериментально снимается кривая процесса регулирования при различных возмущающих воздействиях. Примерный вид кривых процесса регулирования приведен на рис. 8 (а - при возмущении по регулирующему каналу; б—при возмущении по задающему каналу).

По кривой процесса регулирования (переходному процессу) определяют показатели качества регулирования:

1. Время регулирования  $\tau_p$ .
2. Максимальное динамическое отклонение параметра  $x_1$ .
3. Перерегуливание  $x_2/x_1$ .
4. Степень затухания процесса  $\Psi = 1 - x_3/x_1$ .
5. Остаточное отклонение параметра  $\Delta x$ . При правильной настройке регулятора величина  $\Psi$  должна находиться в пределах 0,75 ... 0,9.

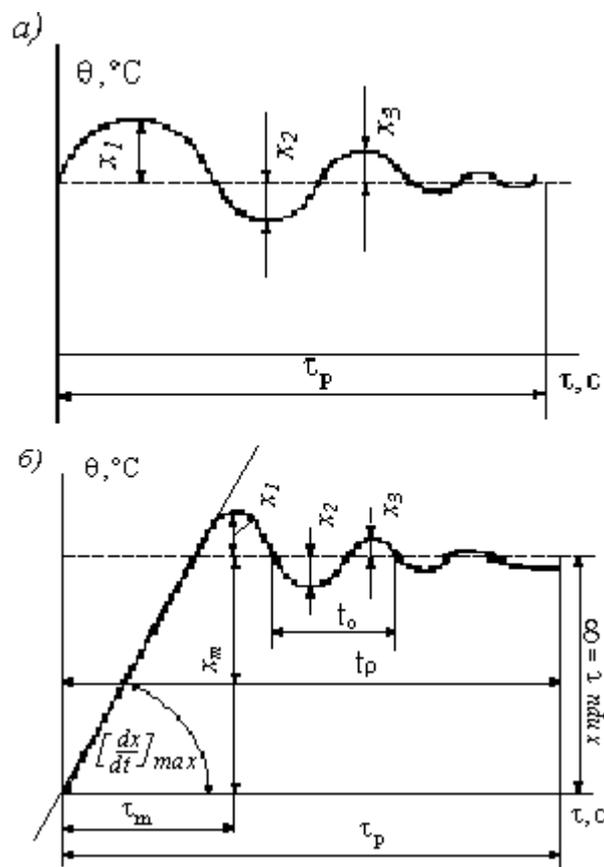


Рис. 8

### III. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка представляет собой систему автоматического регулирования температуры в объекте с электронагревательным элементом с помощью электронного регулятора типа РПИБ-Т. Принципиальная схема лабораторной установки приведена на рис. 9. Нагревательный элемент объекта 1 получает питание от автотрансформатора 6. Параллельно в цепь питания включен вольтметр 5. Температура в объекте измеряется двумя термоэлектрическими преобразователями типа ХА 2 и 3, термоЭДС которых подается соответственно на контрольный измерительный прибор 4 и на вход регулятора 12. При отклонении температуры от заданного значения регулятор посредством магнитного пускателя 9 включает исполнительный механизм 8, который перемещает движок автотрансформатора 6 в сторону, необходимую для возвращения регулируемой величины к заданному значению. Кроме автоматического регулирования в схеме имеется возможность дистанционного управления регулирующим органом (движком автотрансформатора). Для этого в схеме предусмотрены переключатель «Автоматика - Дистанционно» 10 и ключ дистанционного управления 11. При установке переключателя 10 в положение дистанционного управления возможно поворотом ключа 11 управлять перемещением ИМ в ту или другую сторону. Контроль за положением движка автотрансформатора 6 осуществляется с помощью указателя положения регулирующего органа 7.

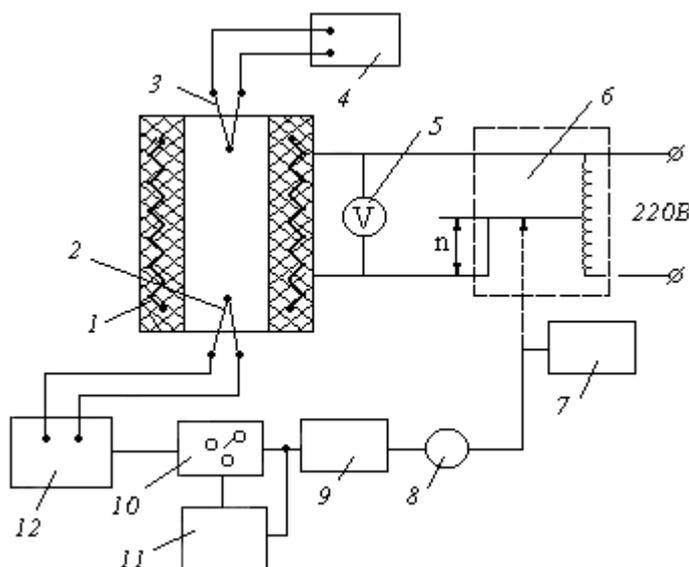


Рис. 9

### IV. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с конструкцией станда, схемой внешних соединений и устройством регулятора типа РПИБ-Т [5].

2. Снять технические и метрологические характеристики используемых в лабораторной работе основных приборов и устройств.

3. Определить динамический и статические параметры объекта, для этого:

а) подать на стенд напряжение, установить переключатель «Автомат - Дистанционно» в положение «Дистанционно» и ключом «Убавить - Прибавить» перевести РО в крайнее левое положение; при этом УП покажет 0%; сделать временную выдержку до состояния теплового равновесия ОР с окружающей средой; записать первоначальное установившееся значение регулируемого параметра (температуры) ;

б) ключом «Убавить - Прибавить» переместить регулирующий орган на (15 ... 20)% по УП, считая за нулевую отметку времени начало перемещения, через заданные интервалы времени записывать показания потенциометра до получения нового установившегося значения температуры.

Данные эксперимента занести в таблицу по форме 5:

Форма 5

$\tau, \text{с}$														
	0	15	30	45	60	75	90	105	120	180	240	300	600	900
$\theta, \text{ }^\circ\text{C}$														

в) после заполнения таблицы ключом «Убавить - Прибавить» установить РО в первоначальное положение, показание УП - 0 %;

г) по данным эксперимента построить динамическую характеристику (кривую разгона) объекта, найти его динамические и статические параметры.

4. Определить закон регулирования, по которому необходимо управлять температурой в объекте, по методике, приведенной в литературе.

5. Синтезировать автоматическую систему регулирования, для этого:

а) выбрать вид энергии, на которой будет работать АОР;

б) составить функциональную схему АСР температуры в ОР;

в) выбрать тип регулятора и конкретные элементы АСР, элементы управления и приборы контроля.

6. Выбрать диапазон регулирования и настроить исполнительный механизм, регулирующий орган и указатель положения на рабочий диапазон регулирования—по указанию преподавателя.

7. Построить статическую характеристику регулирующего органа, для этого с помощью ключа 11 «Убавить—Прибавить» регулирующий орган последовательно перемещать и устанавливать на каждой оцифрованной отметке шкалы по указателю положения УП.

Для каждого положения отсчитать показание вольтметра 5. Данные эксперимента и результаты вычислений занести в таблицу по форме 6.

$n_{УП}, \%$	0	20	40	60	80	100
U, В						
v						

По полученной статической характеристике определить коэффициент передачи регулирующего органа.

8. Определить скорость перемещения регулирующего органа, для этого:

а) с помощью ключа 11 «Убавить - Прибавить» установить регулирующий орган в одно из крайних положений до его остановки концевым выключателем;

б) повернуть ключ 11 в другую сторону, измерить время прохождения регулирующего органа  $\Delta t$  до другого крайнего положения до его остановки другим концевым выключателем;

в) вычислить скорость перемещения регулирующего органа.

9. Настроить измерительный блок регулятора на заданное значение регулируемого параметра, для этого:

а) подобрать сменные резисторы R52 и R53 в зависимости от значения регулируемой температуры (задается преподавателем) и градуировки термоэлектрического преобразователя, выбранного в качестве чувствительного элемента;

б) резисторы R52 и R53 установить на лицевой панели регулятора; ручка «Корректор Т» (R54) позволяет сбалансировать схему измерительного блока на «ноль», т. е. добиться точного значения регулируемого параметра в процессе отладки АСР;

в) определить диапазон действия задатчика типа ЗРУ-24 при  $R51=1$  Ом и подсчитать цену его деления;

г) расширить диапазон действия задатчика (по указанию преподавателя) и подсчитать цену деления в этом случае.

10. Произвести статическую настройку электронного блока регулятора, для этого:

а) отключить питание 220 В;

б) клеммы 14—15, 3—4 и 5—6 соответственно закоротить;

в) поставить перемычку на клеммы «Время изодрома», т. е.  $R9=0$ ; оставить свободными клеммы «Скорость связи», т. е.  $R13=\infty$ ; ручки «Нечувствительность» и «Длительность импульса» повернуть до упора против часовой стрелки, ручку «Корректор» поставить на ноль;

г) включить напряжение питания 220 В на регулятор (клеммы 1 - 2), выдержать 3 мин;

д) сбалансировать электронный блок его корректором, добиваясь погасания сигнальных ламп «Больше» и «Меньше». Если не удастся добиться погасания лампы «Больше», следует снять перемычку между клеммами 3 - 4, если не гаснет лампа «Меньше» - снять перемычку между клеммами 5 - 6 и после этого сбалансировать блок корректором;

е) убедиться, что при повороте ручки «Корректор» по часовой стрелке загорается лампа «Больше», при повороте против часовой стрелки - «Меньше»;

ж) повернуть ручку «Нечувствительность» по часовой стрелке до упора. Проверить максимальную зону нечувствительности по корректору (сумма отклонений делений ручки «Корректор» от положения баланса), которая должна равняться 4 ... 7 большим делениям его шкалы. Вернуть ручку нечувствительность в исходное положение. Отключить питание, снять перемычки (см. п. б).

11. Определить значение оптимальных параметров настроек  $T_{\text{иопт}}$  и  $U_{\text{осопт}}$  регулятора; значения  $n$  и  $S$  принять по указанию преподавателя.

12. Произвести анализ АСР, для этого:

а) установить на регуляторе сменные резисторы R9 «Время изодрома» и R13 «Диапазон скорости связи», рассчитанные в п. 11, а также установить ручку «Скорость связи» на расчетном делении, ручку «Длительность импульса» установить на 4 ... 5 делений; положение задатчика - расчетное или по указанию преподавателя;

б) подать питание 220 В на стенд, ручку переключателя 10 установить в положение «Автомат», сделать временную выдержку до автоматической установки регулируемого параметра (температуры) на заданное значение, точную подгонку до заданного значения произвести ручкой «Корректор T» (R54);

в) переключатель 10 перевести в положение «Дистанционно», ключ 11 установить в положение «Прибавить» и переместить регулирующий орган дополнительно на (20 ... 25) % по указателю положения, затем резко ключ 11 установить в среднее положение, а переключатель 10 - в положение «Автомат»; считая началом эксперимента момент перевода ключа 11 в положение «Прибавить», через каждые 15 с отсчитывать показания потенциометра (изменение температуры объекта) до установившегося значения; результаты эксперимента занести в таблицу по форме 7.

*Форма 7*

$\tau, \text{с}$	0	15	30	...
$\theta, ^\circ\text{C}$				

г) по результатам эксперимента построить кривую процесса регулирования при возмущающем воздействии, определить показатели качества регулирования;

д) перевести ручку задатчика на одно деление в сторону увеличения; считать момент перевода началом эксперимента ( $\tau=0$ ), через каждые последующие 15 с отсчитывать показания потенциометра (изменение температуры объекта) до нового установившегося значения; результаты эксперимента занести в таблицу по форме 7;

е) по результатам эксперимента построить кривую процесса регулирования при задающем воздействии, определить по ней показатели качества регулирования, сравнить их с показателями качества, найденными по п. 12, г.

## V. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Схема лабораторной установки и ее краткое описание.
2. Технические и метрологические характеристики используемых в работе приборов и устройств.
3. Порядок проведения экспериментов.
4. Аналитические расчеты, результаты экспериментов, выводы по работе.

Литература: [4], с. 157 ... 167; [5], с. 20, 49, 94, 152, 166, 181.

### **Работа 4. ИЗУЧЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАЛЬНЫХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

#### I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомление с автоматическими системами регулирования (АСР) на тепловых электростанциях, в промышленных или районных котельных, с их размещением на теплоэнергетическом оборудовании.

#### II. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Автоматические системы регулирования, применяемые на тепловых электростанциях, имеют сложную элементную базу. Весьма наглядным является изложение этой работы на основе структурных схем авторегулирования.

Структурная схема АСР с электронным регулятором, снабженным упругой обратной связью, приведена на рис.10. Схема имеет следующие обозначения: 1 – звено пропорционального усиления; 2 – звено дифференцирования; 3 – сумматор; 4 – интегрирующее звено (в данном случае исполнительный механизм с регулирующим органом); 5 – задатчик.

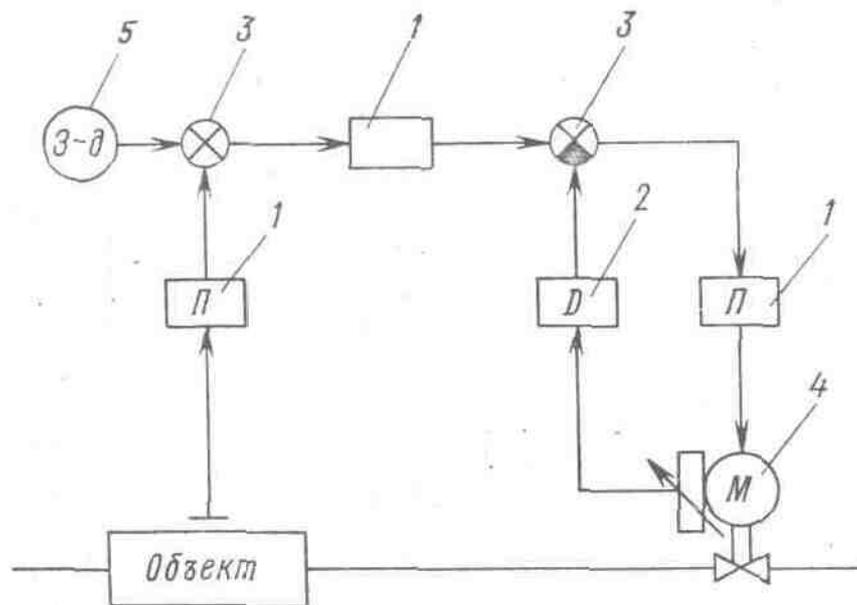


Рис. 10

## 1. Автоматизация процесса горения в котельных установках

### 1.1. Регулирование давления пара и нагрузки котла

Схемы регулирования давления пара и нагрузки котлов зависят от схемы станции. На тепловых электростанциях часто находит применение схема параллельной работы котлов на общую паровую магистраль. По такой схеме некоторые котлы могут быть оставлены в так называемом базовом режиме при постоянной подаче топлива, а другая группа котлов участвует в регулировании нагрузки станции. В этом случае регулятор давления пара, поддерживая давление в общей паровой магистрали, должен одновременно управлять нагрузкой всех котлов, составляющих эту группу. Обычно котлы каждой очереди ТЭЦ (если они имеют близкие характеристики), работают в регулирующем режиме, а в базовый режим переводятся только котлы, имеющие эксплуатационные ограничения при работе в переменных режимах.

На рис.11 изображена схема регулирования давления пара с главным корректирующим регулятором. Особенностью такой схемы является стабилизация режимов работы котлов не только при внешних, но и при внутренних возмущениях, т.е. если подача топлива на одном из котлов уменьшится (допустим, вышла из строя часть пылепитателей) и нагрузка его снизится, то регулятор тепловой нагрузки 2 этого котла увеличит подачу топлива только в свой котел и восстановит его нагрузку вновь до заданного корректирующим регулятором 1 значения.

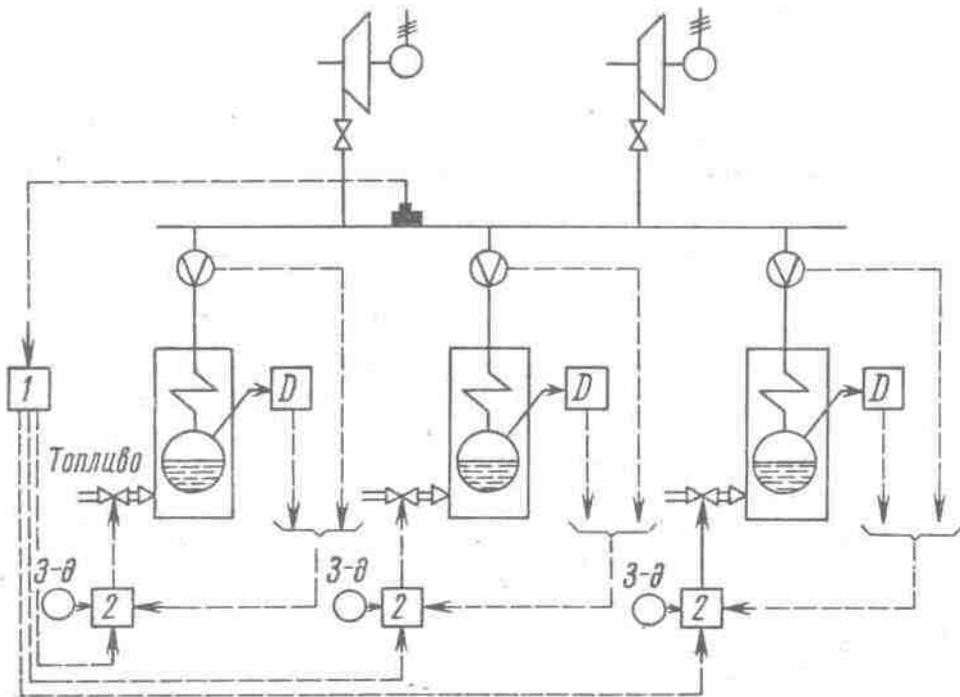


Рис. 11

При внутренних возмущениях тепловая нагрузка котла изменяется быстрее, чем давление пара. Поэтому регулятор тепловой нагрузки воспримет нарушение режима раньше и восстановит подачу топлива прежде, чем оно успеет существенно сказаться на давлении пара в магистрали.

## 1.2. Автоматическое регулирование экономичности процесса горения

На рис.12 совместно с регулятором тепловой нагрузки отдельного котлоагрегата представлен и регулятор экономичности, выполненный по схеме соотношения «тепло-воздух».

Следует иметь в виду, что для большинства энергетических топлив теоретически необходимое количество воздуха  $V_v$  примерно пропорционально теплоте сгорания.

При этом для различных топлив (кроме торфа с большим содержанием влаги) на единицу теплоты, выделившейся при сгорании топлива, требуется примерно одно и то же количество воздуха. Поэтому в данном случае осуществлено регулирование экономичности по соотношению «тепло-воздух», т.е. по соотношению расхода воздуха и тепловой нагрузки котла.

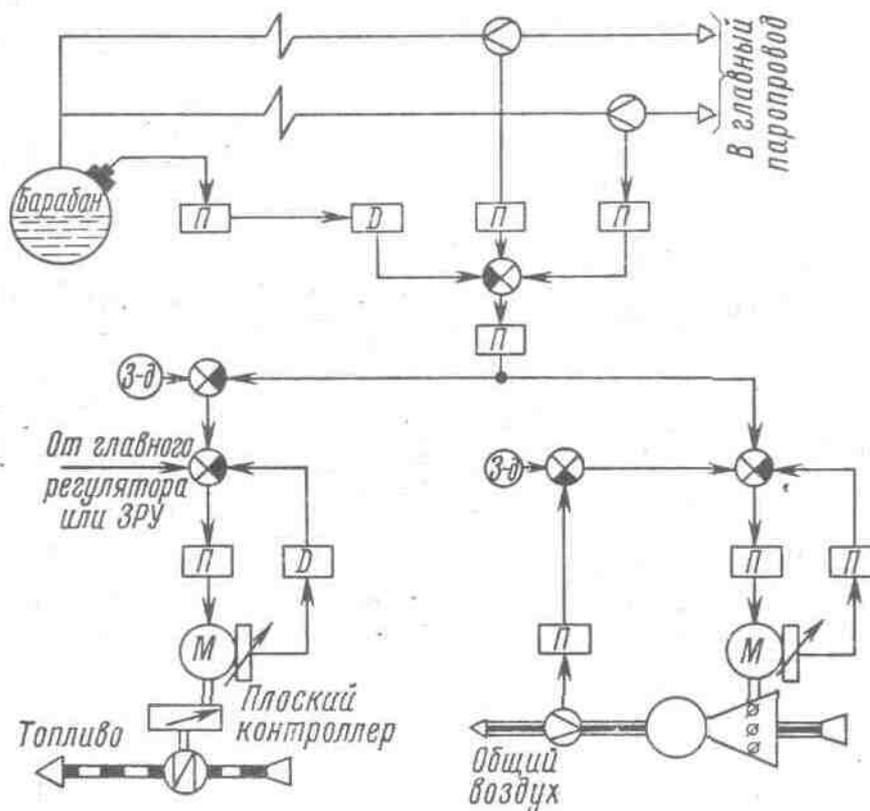


Рис.12

### 1.3. Автоматическое регулирование разрежения котла

Схема регулятора разрежения аналогична схеме, изображенной на рис.10, с той лишь разницей, что регулятор через следящую систему воздействует на два регулирующих органа (направляющие аппараты дымососов). Производительность дымососов в каждый момент времени автоматически (регулятором разрежения) поддерживается таким образом, чтобы в верхней части топки давление находилось в пределах  $9,8/29,4$  Па (1 ... 3 мм вод. ст.).

### 2. Автоматическое регулирование питания водой барабанных котлов высокого давления большой производительности

На паровых котлах электростанций обычно применяют трехимпульсный регулятор питания, схема которого изображена на рис.13.

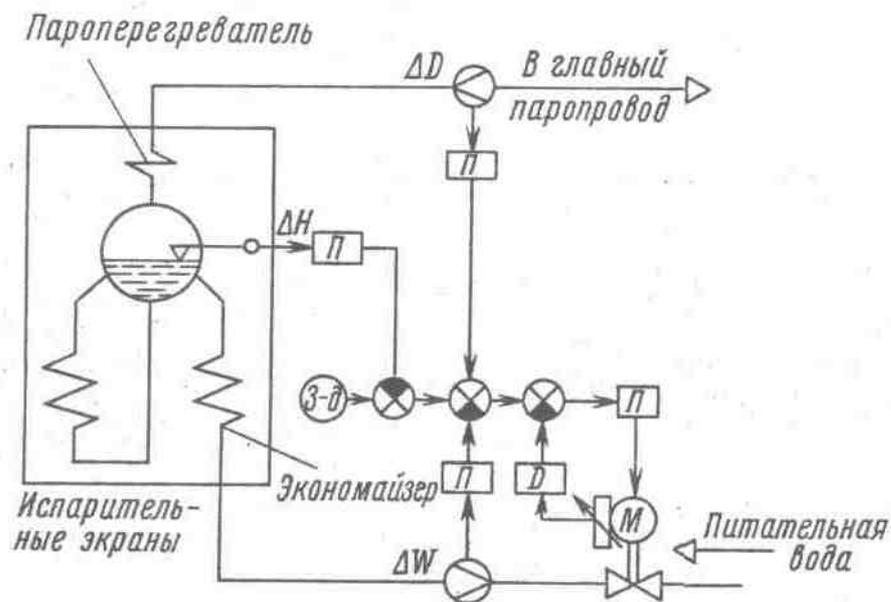


Рис.13

В трехимпульсной схеме перемещение регулирующего органа обусловлено отклонением уровня воды в барабане, изменением расхода пара из котла, а также подачи воды в котел

$$\Delta m = -d(\Delta H) + b(\Delta D) - c(\Delta W), \quad (38)$$

где  $d$ ,  $b$  и  $c$  - коэффициенты, определяющие зависимость между положениями клапана и изменением уровня ( $\Delta H$ ); изменением паровой нагрузки ( $\Delta D$ ) и подачи воды в котел ( $\Delta W$ ). Чтобы регулятор не имел остаточной неравномерности, необходимо выбрать одинаковое влияние импульсов по расходу пара и расходу воды, т.е. принять  $b=c$ .

В этом случае на регулятор будут фактически действовать два импульса: один - по изменению уровня, а второй - по небалансу между расходом пара и подачей питательной воды. Тогда уравнение для перемещения регулирующего органа можно будет привести к следующему виду:

$$\Delta m = -d(\Delta H) + b(\Delta D - \Delta W). \quad (39)$$

### 3. Автоматическое регулирование температуры перегрева пара

Выбор схемы авторегулирования температуры перегрева пара зависит от способа управления перегревом, который принят на данном котлоагрегате, от схемы включения, динамических особенностей пароперегревателя: от

количества его регулируемых частей и рабочего диапазона изменения нагрузок котла. Так, например, котлоагрегаты ТП-230 имеют пароперегреватели с одной регулируемой частью. На этих котлах принят способ управления перегревом с помощью впрыскивающих пароохладителей, установленных в рассечку пароперегревателей. Схема авторегулирования температуры перегрева пара на котле ТП-230 приведена на рис.14.

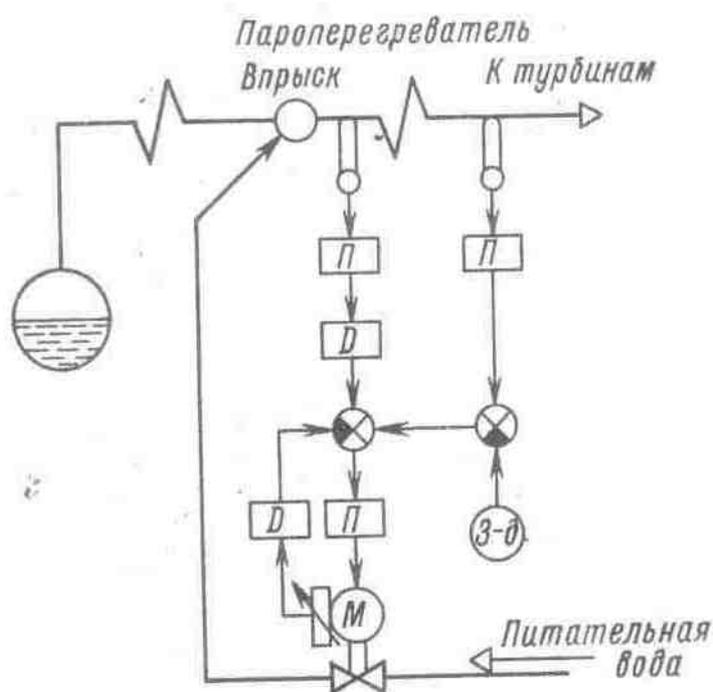


Рис. 14

Иногда АСР отдельных частей пароперегревателя имеют между собой корректирующие связи, обеспечивающие работу регулирующих органов связанных АСР на рабочем участке расходной характеристики.

### III. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

В данной работе лабораторной установкой является действующая ТЭЦ или котельная, снабженные современными автоматическими системами регулирования.

### IV. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с действующими автоматическими системами регулирования в соответствии с указанием преподавателя. При этом обратить особое внимание на отдельные элементы автоматических систем регулирования, их взаимодействие и размещение на объектах регулирования.

2. Произвести запись показаний измерительных приборов, характеризующих работу АСР основного и вспомогательного оборудования.

## V. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Принципиальная и структурная схемы авторегулирования тепловых процессов котлоагрегатов и вспомогательного оборудования и их краткое описание.

2. Метрологические характеристики используемых в работе средств измерений.

3. Выводы о работе АСР основного и вспомогательного оборудования, сделанные на основе показаний измерительных приборов.

Литература: [2], с.207...226.

## **Работа 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАЛЬНОГО ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА**

### I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определение экспериментальным путем динамических свойств регулируемого объекта, ознакомление с инженерным методом расчета параметров настройки автоматического регулятора на реальном теплоэнергетическом объекте.

### II. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В основном система автоматического регулирования, представленная на рис.15, состоит из регулируемого объекта 1 и воздействующего на него через регулирующий орган 3 регулятора 2. Задача регулятора состоит в автоматическом поддержании заданных условий протекания технологического процесса в данном регулируемом объекте.

Процесс регулирования должен быть устойчивым. Кроме устойчивости к системам автоматического регулирования предъявляются требования качества переходного процесса. Качество системы тем выше, чем меньше динамическое отклонение регулируемой величины и чем меньше время переходного процесса, возникающего в системе регулирования под действием различных возмущений.

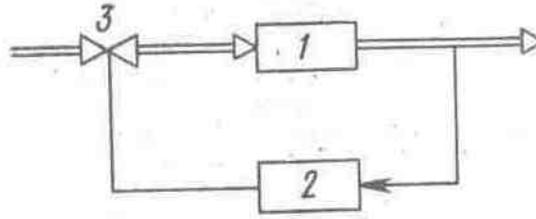


Рис. 15

Правильно настроить регулятор - это значит выбрать параметры настройки, обеспечивающие наилучшее качество регулирования. Для правильной настройки регулятора нужно знать не только его свойства, но и, главным образом, динамические свойства регулируемого объекта.

Поскольку аналитический расчет динамических свойств ряда регулируемых объектов теплоэнергетических установок в настоящее время не может быть выполнен достаточно точно, приходится использовать экспериментальные инженерные методы расчета. Наиболее широкое применение получил метод определения динамических параметров регулируемого объекта по нормальной характеристике разгона (кривая разгона), под которой понимается кривая изменения регулируемой величины во времени в результате однократного возмущения при отключенном регуляторе.

### *1. Методика определения основных динамических параметров регулируемого объекта*

Для определения основных динамических параметров регулируемого объекта  $\tau$ ,  $\varepsilon$ ,  $\rho$  достаточно провести касательную к кривой разгона в наиболее крутой ее части, как это показано на рис. 16а.

Тогда скорость разгона

$$\varepsilon = \frac{b}{\tau\lambda_1} . \quad (40)$$

Коэффициент самовыравнивания

$$\rho = \frac{\lambda_1}{\delta_n} . \quad (41)$$

Если возмущение производится при помощи регулирующего органа, на который будет воздействовать регулятор «основное возмущение», то эти параметры обозначаются  $\tau_0$ ,  $\varepsilon_0$ ,  $\rho_0$ .

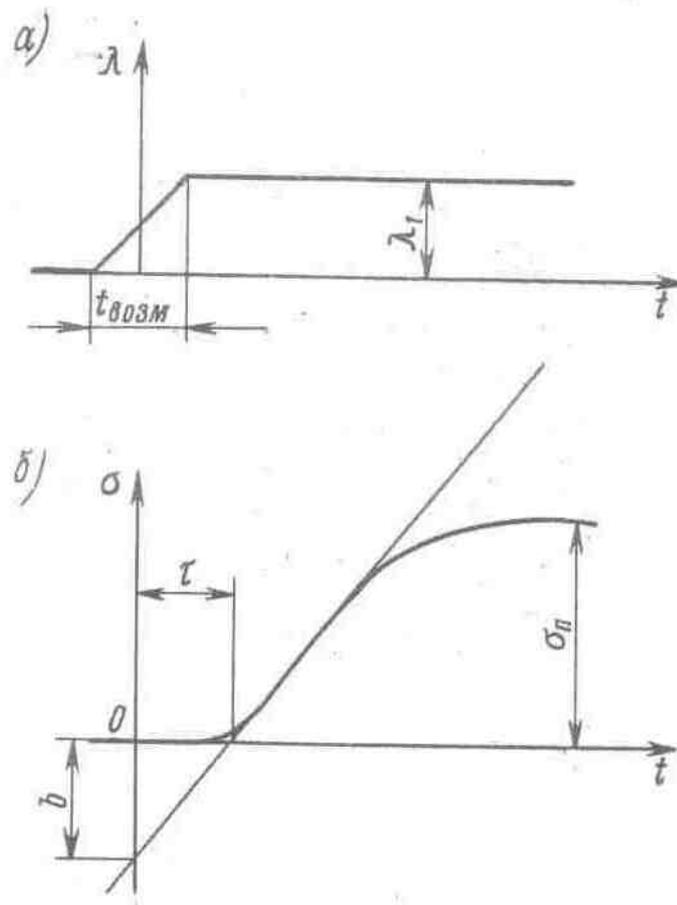


Рис. 16

Для определения максимальных отклонений регулируемой величины при работе регулятора в результате внешних возмущений необходимо располагать параметрами регулируемого объекта, аналогично найденными из соответствующих характеристик разгона (рис.16б).

Если возмущение наносят регулирующим органам регулятора через ключ дистанционного управления регулятора, то оно длится определенное время  $t_{\text{возм}}$  (рис.16а).

## 2. Расчет оптимальных параметров настройки автоматического регулятора

Целью настройки АСР является обеспечение наивыгоднейшего переходного процесса регулирования, возникающего в результате возмущения регулируемого объекта. Переходный процесс считают оптимальным тогда, когда наибольшее отклонение регулируемой величины и длительность переходного процесса минимальны, а затухание колебаний - достаточно интенсивно.

На рис.17 приведены три кривые переходного процесса при наличии регулятора с упругой обратной связью.

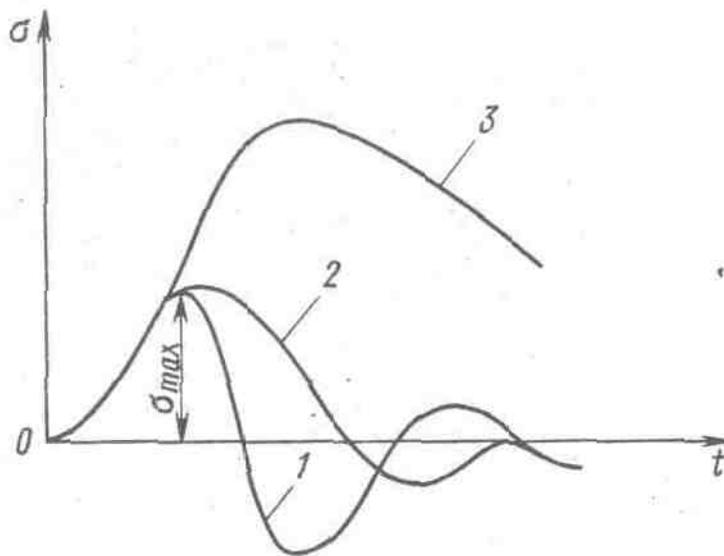


Рис. 17

Кривая 1 иллюстрирует медленно затухающие колебания регулируемой величины  $\delta$ , кривая 2 близка к оптимальной форме переходного процесса, наконец, кривая 3 соответствует «затянному» процессу и большому отклонению регулируемой величины. Для достижения оптимального характера переходного процесса необходимо установить определенные параметры настройки автоматического регулятора, исходя из динамических характеристик регулируемого объекта. Под параметрами настройки регулятора понимают скорость регулирования  $S$ , зону нечувствительности  $\Delta$ , скорость обратной связи  $\nu$ , время изодрома  $T_{из}$  и время предварения  $T_{п}$ .

Излагаемый метод расчета настройки регулятора в данном методическом руководстве является приближенным. Скорость регулирования  $S$  может быть подобрана с учетом следующих условий:

- снижение скорости может привести к тому, что при больших возмущениях регулятор перейдет в режим постоянной скорости. В этих условиях увеличиваются отклонения регулируемой величины и продолжительность переходного процесса;
- увеличение скорости регулирования приводит к необходимости установки больших значений скорости обратной связи  $\nu$ , вызывает повышение частоты включений сервомотора в пульсирующем режиме и т.д.

Зону нечувствительности  $\Delta$  для улучшения качества регулирования желательно выбирать минимальной, однако это приводит к увеличению частоты срабатывания регулятора.

В табл.1 приводятся формулы для приближенного расчета динамических параметров настройки изодромного регулятора, а в табл.2 - выбора коэффициента его нечувствительности.

Таблица 1

Расчет динамических параметров издромного регулятора для различных видов регулируемых объектов

Объект	Без самовыравнивания	С самовыравниванием	
	$\varepsilon\tau = 0 \dots 0,2$	$0,2 < \varepsilon\tau < 1,5$	$\varepsilon\tau > 1,5$
Оптимальная скорость связи $\nu$ , мВ/с	$1,1n \cdot \varepsilon_0 \tau_0 \cdot S$	$2,6n \frac{S}{\rho_0} \cdot \frac{\varepsilon_0 \rho_0 \tau_0 - 0,08}{\varepsilon_0 \rho_0 \tau_0 + 0,6}$	$\frac{2}{\rho_0}$
Оптимальное время сервомотора $T_c^{\text{опт}}$ , с	$2\tau_0$	$2\tau_0$	$2\tau_0$
Оптимальное время издрома $T_{и}$ , с	$3,3\tau_0$	$\frac{0,8}{\varepsilon_0 \rho_0 \tau_0} \cdot \tau_0$	$0,6\tau_0$
Допустимое время сервомотора $T_c$ , с	$(1 \dots 4)\tau_0$	$(1 \dots 4)\tau_0$	$(1 \dots 4)\tau_0$

Таблица 2

Выбор коэффициента нечувствительности для электронного регулятора

Зона нечувствительности электронного блока $\Delta\varepsilon$ , мВ	До 10	10...20	20...30	30...40
Рекомендуемый коэффициент чувствительности измерительного блока, n	1	0,5	0,35	0,25

### III. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

В качестве лабораторной установки на действующем предприятии могут быть использованы различные регулируемые объекты теплосилового оборудования, например пароперегреватели котельных агрегатов, регенеративные или теплофикационные подогреватели турбин и др.

#### **IV. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.**

1. Под руководством преподавателя на действующем регулируемом объекте изучается технологический процесс и режим его работы.

2. Изучаются типы и параметры элементов АСР, которой снабжен изучаемый регулируемый объект. Одновременно наблюдается ее работа. Затем преподаватель отключает автоматическое управление технологическим процессом на объекте регулирования и переводит объект на дистанционное управление.

3. Производится снятие кривой разгона объекта, записываются необходимые измерения в протоколе исследований, после чего преподаватель вновь включает автоматическое управление технологическим процессом объекта.

4. Выполняется обработка снятой кривой разгона и определяются необходимые динамические параметры объекта регулирования. Выполняется расчетная часть работы с определением положения органов настройки АСР.

5. Данные расчета сравниваются с параметрами настройки действующей АСР изучаемого объекта.

#### **V. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА**

1. Краткое описание технологического процесса и режима работы изучаемого объекта регулирования.

2. Метрологические характеристики используемых в работе средств измерений.

3. Протоколы исследований.

4. Схема объекта регулирования (условно) и структурная схема АСР.

5. Кривая разгона объекта и ее обработка.

6. Расчет настройки АСР.

7. Выводы о работе.

Литература: [3]; [4], с. 182.. .186.

