

Министерство образования и науки Российской Федерации
Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова

Т.Г. Обухова, И.Г. Самарина

**Исследование промышленных систем
автоматического управления
технологическими параметрами**

*Утверждено Редакционно-издательским советом
университета в качестве практикума*

г. Магнитогорск
2012

УДК 65.011.56(075)

Рецензенты:

*Заведующий кафедрой прикладной информатики
и управляющих систем автоматики НФ «МИСиС»,
доцент, кандидат технических наук*

С.Н. Басков

Старший преподаватель АНО КЦПК «Персонал»

Г.Ф. Обухов

Обухова, Т.Г.

Исследование промышленных систем автоматического управления технологическими параметрами: практикум / Т.Г. Обухова, И.Г. Самарина. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. – 57 с.

В практикуме представлены семь лабораторных работ. В работах последовательно изучаются основные для понимания сути автоматического управления вопросы. Описаны основные способы исследований статических и динамических свойств объектов управления, виды и методы расчета оптимальных настроек типовых регуляторов, способы оценки качества систем автоматического управления.

Практикум предназначен для студентов, изучающих дисциплины «Автоматизированные системы управления технологическими процессами»; «Управление, сертификация и инноватика» специальностей 260301, 260303, 140104, направления 140100.

УДК 65.011.56(075)

- © Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2012
- © Обухова Т.Г., Самарина И.Г., 2012

ВВЕДЕНИЕ

Управление – есть процесс формирования целей, отыскание и реализация способов их достижения. Цели могут быть разнообразны, например достижение требуемого по технологии состояния продукции или определенный ход процесса.

Управление с помощью технических средств без участия человека называется автоматическим управлением. Совокупность объектов управления и средств автоматического управления называется системой автоматического управления (САУ).

Процесс или технологическое оборудование, в котором протекает управляемый процесс, рассматриваются как объекты управления (ОУ). В самом простом случае состояние ОУ характеризуется одной физической величиной (параметром). Например, ОУ – нагревательная печь, управляемый параметр – температура в печи, или ОУ – паровой котел, управляемый параметр – давление пара. В лабораторных работах №1–3 исследуются характеристики ОУ.

Основной задачей САУ является поддержание определенного закона изменения технологического параметра без непосредственного участия человека. Закон изменения параметра задается по программе в соответствии с требованиями технологической инструкции или технического персонала. В лабораторной работе №4 приведены простейшие способы оценки качества работы систем автоматического управления. В лабораторной работе №5 изучаются типовые законы регулирования и их особенности.

В самом простейшем случае САУ автоматически поддерживает технологический параметр на одном заданном значении. Системы, реализующие такую цель, называются системами стабилизации. Системы стабилизации существуют в любой, вне зависимости от сложности, даже многоуровневой автоматизированной системе управления (АСУ). В лабораторных работах №6, 7 изучаются промышленные системы автоматического регулирования САР на примере двух одноконтурных систем стабилизации технологического параметра: САР температуры и САР давления в пространстве технологической печи.

Лабораторная работа №1

ИЗУЧЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Цель работы: экспериментальное исследование статической характеристики объекта и определение коэффициента передачи объекта, нахождение функциональной зависимости между входной и выходной величинами.

1. Общие сведения

1.1. Общие сведения о статических характеристиках

Режим работы САУ, в котором управляемая величина и все промежуточные величины¹ не изменяются во времени, называется *установившимся*, или *статическим, режимом*.

Звено с одним входом и одним выходом в статическом режиме описывается *уравнением статики*, в котором отсутствует параметр времени t : $y = F(u)$, где u – входное воздействие, F – некоторая функция (рис. 1).

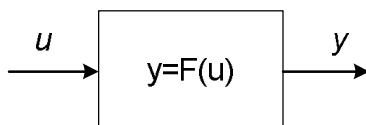


Рис. 1. Объект управления и его входная и выходная величины

График уравнения статики называется *статической характеристикой* (рис. 2). Звенья, у которых статическая характеристика – прямая, называются *линейными* (рис. 2, а).

По статической характеристике можно определить один из важнейших параметров ОУ – коэффициент передачи $K_{об}$:

$$K_{об} = \frac{\Delta Y}{\Delta U}. \quad (1)$$

Коэффициент передачи $K_{об}$ равен отношению приращения выходной величины ΔY к приращению входной ΔU в установившемся режиме; измеряется в единицах [ед. вых./ед. вх.], например, [ОС/%] или [Па/%]. Если же входной и выходной сигналы измеря-

¹ Исключениями являются астатические звенья, о чём сказано далее.

ются в одинаковых единицах, то у K_{OB} не будет размерности и тогда его называют коэффициентом усиления.

Объект считается линейным, если коэффициент передачи K_{OB} является постоянной величиной на всем диапазоне изменения входного сигнала: $K_{OB} = const$ (см. рис. 2, а).

Статические характеристики реальных звеньев, как правило, нелинейны (рис. 2, б). Такие звенья называются нелинейными и коэффициент передачи является переменной величиной, зависящей от входного параметра $K_{OB} = f(U)$. Например, если приращение входного сигнала выбрать постоянной величиной ΔU по рис. 2, б:

$$K_{OB1} = \frac{\Delta Y_1}{\Delta U}; \quad K_{OB2} = \frac{\Delta Y_2}{\Delta U}. \quad (2)$$

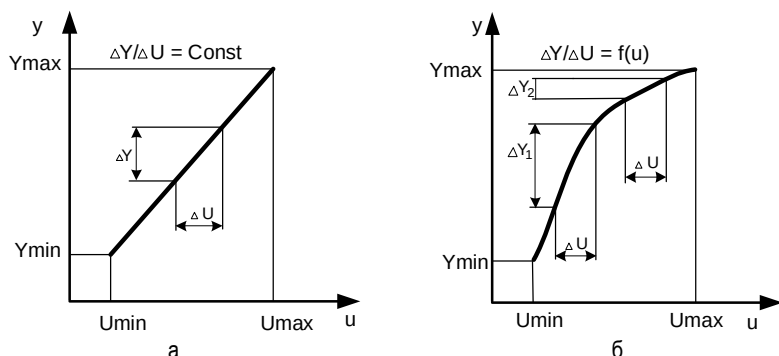


Рис. 2. Виды статических характеристик

Если у звена два входа, то оно в статическом режиме описывается уравнением статики как функция двух переменных: $y = H(u, v)$, где u – управляющее воздействие, направленное на объект от управляющего устройства (УУ), v – возмущение (рис. 3, а). Такому звену будут соответствовать два семейства статических характеристик:

$$y = \begin{cases} F_1(u), \text{ при } v = v_1 \\ F_2(u), \text{ при } v = v_2 \\ \dots \\ F_N(u), \text{ при } v = v_N \end{cases}; \quad y = \begin{cases} G_1(u), \text{ при } u = u_1 \\ G_2(u), \text{ при } u = u_2 \\ \dots \\ G_K(u), \text{ при } u = u_K \end{cases},$$

где F, G – некоторые функции, n и k – положительные целые числа.

Каждое такое семейство представляет собой зависимость выходной величины от одной входной при фиксированных значениях

другой входной величины. Графики статических характеристик по входному управляющему воздействию при фиксированных значениях возмущения v_i ($i = 1, \dots, n$) представлены на рис. 4, а. На рис. 4, б – семейство статических характеристик по возмущению при фиксированных значениях u_j ($j = 1, \dots, k$).

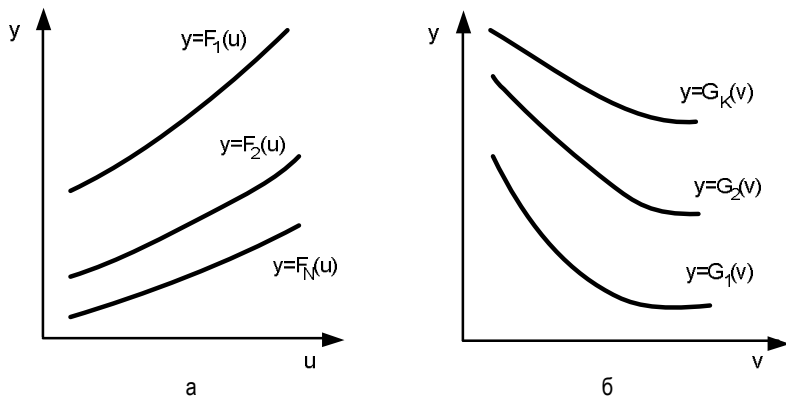


Рис. 4. Пример статических характеристик ОУ с двумя входами

Для линейных систем справедлив принцип суперпозиции, реакция звена на несколько одновременно действующих воздействий равна сумме реакций на каждое воздействие в отдельности. Следовательно, функцию двух переменных $y=H(u,v)$ можно представить как сумму двух функций $y = H(u,v) = F(u) + G(v)$, и структурная схема примет вид, как показано на рис. 3, б.

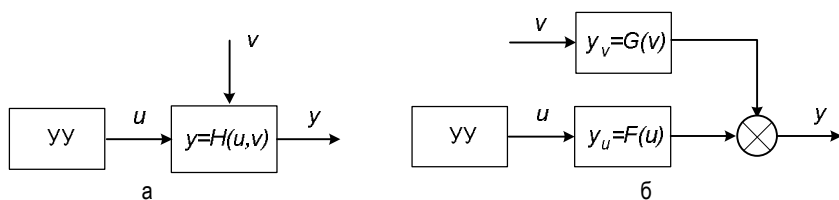


Рис. 3. Преобразование линейных систем

Теперь можно рассматривать ОУ как два отдельных звена с обычными статическими характеристиками $F(u)$ и $G(v)$. При любом количестве входных величин ОУ можно свести к сумме простейших звеньев с одной парой вход–выход. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать объекты только с одним входным и выходным сигналами.

В качестве входной величины для ОУ обычно используется положение регулирующего органа или процент хода перемещения вала исполнительного механизма (ИМ) системы регулирования. В лабораторном стенде эта величина измеряется и выводится на дистанционный указатель положения (потенциометр) в процентах от 0 до 100%. В качестве выходной величины ОУ – регулируемая величина, значение которой отображается на вторичном приборе ДИСК-250 (КСП-3, ВФСМ). Единицы измерения и размерность выходной величины указаны на шкале вторичного прибора.

Статическая характеристика позволяет определить границы управляемости объекта, т.е. в каких пределах может изменяться регулируемый параметр при изменении входного параметра. Изменение же входного параметра ограничено концевыми выключателями ИМ в положениях 0 и 100% соответственно.

Существуют звенья и ОУ, для которых невозможно определить зависимость между определенными значениями выходной и входной величинами, их называют *астатическими*. Изобразить на графике подобную зависимость $y = f(u)$ невозможно. Выходная величина астатического звена даже в установившемся режиме будет изменяться по какому-либо закону^{II}.

С помощью астатического звена можно представить модель ОУ перемещающегося в пространстве (или в пространстве перемещаются отдельные его части). Например, двигатель: входная величина – напряжение питания, выходная величина – угол поворота вала двигателя φ , значение угла будет постепенно увеличиваться. Другой пример астатического объекта – любая ёмкость с жидкостью с фиксированным стоком: входная величина – приток жидкости в бак, выходная величина – уровень жидкости.

1.2. Расчет статической характеристики объекта управления

Во время снятия статической характеристики в производственных условиях возможны погрешности и прочие неточности и отклонения, связанные с внешними возмущениями, действующими на ОУ, навыками оператора и т.п. Поэтому при экспериментальном определении статической характеристики речь идет об определении экспериментальной *статистической зависимости* между входным u и выходным y параметрами.

^{II} Например, линейно возрастать, и тогда зависимость между входом и выходом в установившемся режиме можно описать уравнением $y' = f(u)$. В этом случае, говорят, что звено обладает астатизмом первого порядка. Для звена с астатизмом второго порядка установившийся режим $y'' = f(u)$.

Функциональная зависимость $y = f(u)$, определяющая статистическую связь между u и y , называется *линией регрессии*.

Запас функций, которыми можно математически выразить линию регрессии, разнообразен, но обычно предпочтение отдается многочленам целых положительных степеней:

$$\bar{y}(u) = a + b \cdot u + c \cdot u^2 + \dots + q \cdot u^d, \quad (3)$$

где $\bar{y}(u)$ – ордината теоретической линии регрессии; $a, b, \dots, q$ – коэффициенты; d – порядок многочлена.

Статистические характеристики промышленных объектов, как правило, нелинейны и для получения уравнения теоретической линии регрессии целесообразно использовать полиномы второй и более высоких степеней. С другой стороны, управлять линейным объектом гораздо удобнее. Поэтому если есть возможность линеаризации (замены нелинейной функции прямой линией на рабочем участке характеристики), то этим нужно воспользоваться.

При использовании статистических зависимостей необходимо помнить следующее: как бы точно тот или иной многочлен не воспроизводил искомую зависимость в заданном интервале изменения аргумента, это не дает основания полагать, что вне этого интервала данный многочлен будет соответствовать действительному ходу изменения функции.

Линия регрессии решает вопрос интерполяции, т.е. нахождения значений функции внутри некоторого интервала значений аргумента и не оценивает течение процесса вне рассматриваемого интервала, т.е. не решает задачу экстраполяции.

Для определения уравнения теоретической линии регрессии необходимо, чтобы искомая линия подходила к экспериментальным точкам как можно ближе. Близость каждой экспериментальной точки линии регрессии измеряется отрезком ординаты:

$$\Delta Y_i = Y_i - \bar{y}(U_i), \quad (4)$$

где Y_i – экспериментальное (измеренное) значение выходной величины при входном значении U_i ; $\bar{y}(U_i)$ – ордината линии регрессии при $u = U_i$.

Для расчета теоретической линии регрессии наиболее часто применяется метод наименьших квадратов, т.е. для всего интервала изменения аргумента должно выполняться условие

$$\sum_{i=1}^m (Y_i - \bar{y}(U_i))^2 \rightarrow \min, \quad (5)$$

где m – число экспериментальных пар^{III} $Y_i - U_i$. Из условия (5), составим систему уравнений, если порядок многочлена $d = 3$

$$\begin{cases} \sum Y_i = c \sum U_i^2 + b \sum U_i + am, \\ \sum U_i Y_i = c \sum U_i^3 + b \sum U_i^2 + a \sum U_i, \\ \sum U_i^2 Y_i = c \sum U_i^4 + b \sum U_i^3 + a \sum U_i^2. \end{cases} \quad (6)$$

Суммы^{IV} при искомым коэффициентах системы удобно рассчитывать по табл. 1.

Таблица 1

Расчет коэффициентов линии регрессии

Номер пары	U_i	Y_i	$U_i Y_i$	U_i^2	$U_i^2 Y_i$	U_i^3	U_i^4
1							
2							
...							
m							
Σ^V							

Подставив значения из последней строки табл. 1 в систему уравнений (6) и решив её, определим неизвестные коэффициенты уравнения (3) a, b, c . Получив линию регрессии, легко определить теоретический коэффициент передачи объекта, продифференцировав полученное уравнение:

$$\bar{K}_{об} = \frac{d}{du} [\bar{y}(u)]. \quad (7)$$

1.3. Порядок выполнения работы

1. Подготовить рабочий журнал наблюдений в соответствии с табл. 2.

2. Включить лабораторный стенд – загорится лампочка «Работа включена». С помощью универсального переключателя УП-1 перевести САР в ручной режим (положение «Руч.»).

^{III} Для выполнения удачного расчета экспериментальную пару значений при нулевом входном воздействии лучше отбросить.

^{IV} В системе (4) все суммы по $i = 1, \dots, m$.

^V В последнюю строку таблицы вписывается сумма по каждому столбцу.

3. С помощью УП-2 и положений больше «>» и меньше «<» установить положение вала ИМ на 0% хода вала ИМ и дождаться достижения выходной величиной установившегося значения. Записать полученное значение в журнал наблюдений.

Таблица 2

Экспериментальные данные

№ п/п	U_i , % хода ИМ	Y_i	ΔY_i	$K_{OБi} = \frac{\Delta Y_i}{\Delta U_i}$ (формулы (1), (2))	$\bar{y}(U_i)$ (формула (3))	$\bar{K}_{OБ}$ (формула (7))
		единицы регулируемой величины				
1	2	3	4	5	6	7
1	0					
2	10					
3	20					
..	..					
..	100		—	—		

4. При помощи кнопок «>» и «<» установить положение вала ИМ на 10% хода; дождаться перехода Y в новое установившееся значение по шкале вторичного прибора и занести данные в журнал наблюдений.

5. Повторить пункт 4 для 20, 30, ..., 100% угла поворота вала ИМ.

6. На основе полученных данных построить график статической характеристики ОУ: ось абсцисс – % хода вала ИМ, ось ординат – единицы регулируемого параметра.

7. Рассчитать графы 4 и 5 табл. 2. Построить график зависимости $K_{OБ}$ от положения вала ИМ. График построить следующим образом: ось абсцисс – % хода вала ИМ, ось ординат – коэффициент передачи. На оси абсцисс нанести отсчеты, соответствующие 5, 15, 25, ..., 95% хода ИМ и от каждой отсчетки провести ординату, соответствующую значению $K_{OБ}$ из графы 5 табл. 2 определенному на интервалах 0–10, 10–20, 20–30, ..., 90–100% соответственно. Провести усредненную линию. Рассчитать среднее значение коэффициента передачи по графе 5, изобразить на графике:

$$\tilde{K}_{OБ} = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^{m-1} K_{OБi}. \quad (8)$$

8. По методике, описанной в подразд. 1.2 лабораторной работы рассчитать линию регрессии $\bar{y}(U_i)$ и теоретическое значение коэффициента передачи $\bar{K}_{OБ}$. Заполнить графы 6 и 7 табл. 2.

9. Построить на уже имеющихся графиках статической характеристики и коэффициента передачи их теоретические значения. Сравнить расчётные значения с экспериментальными.

10. Сделать выводы о типе ОУ по виду его статической характеристики. Оценить пределы изменения коэффициента передачи. Определить среднее значение коэффициента передачи.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое управление, автоматическое управление?
2. Какую задачу выполняют системы автоматической стабилизации?
3. Что называется статическим режимом САУ?
4. Что называется статическими характеристиками САУ?
5. В чём смысл МНК?
6. Что такое коэффициент передачи, в чём его отличие от коэффициента усиления?
7. В чём отличие нелинейных звеньев от линейных?
8. В чём отличие статических звеньев от астатических?

Лабораторная работа №2

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ ПО КРИВОЙ РАЗГОНА

Цель работы: экспериментальное исследование кривой разгона объекта управления и определение динамических параметров объекта, построение кривой разгона.

1. Общие сведения

1.1. Общие сведения о динамических характеристиках

Установившийся режим, рассмотренный в предыдущей работе, не является характерным для САУ. Обычно на управляемый процесс действуют различные возмущения, отклоняющие управляемый параметр от заданной величины. Либо изменяется сама величина задания в связи с изменениями технологических условий.

Процесс установления требуемого значения управляемой величины называется регулированием и относится к динамическому режиму. Из-за инерционности ОУ и других элементов САУ процесс регулирования не может протекать мгновенно.

Поведение САУ или любого её звена в динамических режимах описывается уравнением динамики, которое в общем виде можно записать так:

$$F(y, y', y'', \dots, u, u', u'', \dots, f, f', f'', \dots) = 0, \quad (1)$$

где y – выходной сигнал; u – управляющий сигнал; f – возмущение.

В большинстве случаев уравнение динамики оказывается нелинейным. Для упрощения нелинейные уравнения заменяют линейными, которые приблизительно описывают динамические процессы в САУ вблизи номинальных значений входных и выходных величин. Получаемая при этом точность уравнений оказывается достаточной для решения поставленных задач. Процесс преобразования нелинейных уравнений в линейные называется *линеаризацией* уравнений динамики.

Исходными данными для составления дифференциальных уравнений являются математические выражения физических законов, определяющих неустановившийся процесс в ОУ или другом элементе системы.

При отсутствии возмущения зависимость выходной величины от входной в неустановившемся режиме выражается линейным дифференциальным уравнением вида:

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 &= \\ &= b_m \frac{d^m u(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} u(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{du(t)}{dt} + b_0, \end{aligned} \quad (2)$$

где $a_0, \dots, a_n, \dots, b_0, \dots, b_m$ – постоянные коэффициенты; n, m – порядок производных.

В теории автоматического управления (ТАУ) для записи и решения дифференциальных уравнений используется операторный метод, который при нулевых начальных условиях позволяет значительно упростить запись и решение дифференциальных уравнений^{VI}:

$$\begin{aligned} L \left\{ \frac{d^n y(t)}{dt^n} \right\} &= p^n \cdot Y(p), \quad L \left\{ \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} \right\} = p^{n-1} \cdot Y(p), \\ L \left\{ \frac{dy(t)}{dt} \right\} &= p \cdot Y(p), \quad L \{ C \cdot y(t) \} = C \cdot Y(p). \end{aligned} \quad (3)$$

^{VI} Используется преобразование Лапласа при нулевых начальных условиях слева от нуля $y(-0) = y'(-0) = y''(-0) = \dots = u(-0) = u'(-0) = u''(-0) = \dots = 0$.

Тогда уравнение (2) в операторной форме примет вид:

$$\begin{aligned} & (a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0) \cdot Y(p) = \\ & = (b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0) \cdot U(p), \end{aligned}$$

где $Y(p)$, $U(p)$ – изображение по Лапласу выходного и входного параметров.

Операторная форма записи уравнения позволяет получить очень важную динамическую характеристику ОУ – передаточную функцию $W(p)$:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0}. \quad (4)$$

Дифференциальный оператор $W(p)$ называют *передаточной функцией* (ПФ). ПФ определяет отношение выходной величины к входной величине звена (или ОУ) в операторной форме по Лапласу при нулевых начальных условиях.

По передаточной функции можно определить выходной сигнал звена в каждый момент времени при произвольном входном воздействии, и поэтому ПФ является основной характеристикой звена в динамическом режиме^{VII} и из неё возможно получить все остальные характеристики.

Знаменатель передаточной функции называют *характеристическим полиномом*. Его корни, т.е. значения p , при которых знаменатель обращается в ноль, а $W(p)$ стремится к бесконечности, называются *полюсами передаточной функции*.

Числитель ПФ называют *операторным коэффициентом передачи*. Его корни, при которых и числитель и сама ПФ равны нулю, называются *нулями передаточной функции*.

При входном воздействии $u(t)$ произвольной формы траекторию выходного сигнала можно определить по формуле

$$y(t) = L^{-1}\{W(p)L\{u(t)\}\} = L^{-1}\{W(p)U(p)\},$$

$L^{-1}\{ \}$ – обратный преобразователь Лапласа.

Для оценки динамических свойств системы и отдельных звеньев принято исследовать их реакцию на *типовые входные воздействия*, которые отражают особенности реальных возмущений.

^{VII} Для установившегося режима все производные величин $d/dt = 0$, т.е. $p = 0$, поэтому ПФ превращается в коэффициент передачи звена $K = b_m/a_n$.

Это позволяет сравнивать отдельные звенья между собой с точки зрения их динамических свойств. А также, зная реакцию системы на типовые воздействия, можно судить о том, как она будет вести себя при сложных изменениях входной величины.

Самыми распространенными типовыми воздействиями являются: *ступенчатое*, *импульсное* и *гармоническое* воздействия. Особенно важное значение в ТАУ придают однократному ступенчатому воздействию $1(t)$. Все остальные воздействия могут быть сведены к нему.

Зависимость изменения выходной величины звена во времени при подаче на его вход единичного ступенчатого воздействия при нулевых начальных условиях называется *переходной характеристикой* $h(t)$. Переходная характеристика выражается из ПФ через обратное преобразование Лапласа:

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

На практике вместо переходной характеристики используется кривая разгона, она дает наглядное представление о характере переходного процесса в объекте. *Кривая разгона* – траектория изменения выходного параметра во времени при однократном скачкообразном возмущении на входе.

По виду кривых разгона все объекты управления можно разделить на объекты с самовыравниванием (рис. 1, а) и объекты без самовыравнивания (рис. 1, б).

Большая часть объектов относится к первой группе. Для подобных ОУ выходная величина после скачкообразного входного возмущающего воздействия изменяется с постепенно уменьшающейся скоростью до момента достижения нового установившегося значения. Например, термopара (см. рис. 1, а): после резкого изменения температуры греющей среды выходной сигнал постепенно достигает установившегося значения, соответствующего измеряемой температуре. Для термopар это время может составлять от 1,5 до 4 мин. После снижения температуры в печи до температуры окружающей среды выходной сигнал термopары через некоторое время станет равным нулю.

Свойство объекта возвращаться в исходное состояние после устранения внешних воздействий называется *самовыравниванием*.

В объектах без самовыравнивания при подаче на вход ступенчатого сигнала изменение выходной величины может происходить беспредельно, вплоть до возникновения аварийных ситуаций. Пример объекта без самовыравнивания – резервуар с фиксиро-

ванным стоком: при увеличении притока воды в бак уровень начинает постепенно подниматься, пока вода не перельется через край бака (см. рис. 1, б).

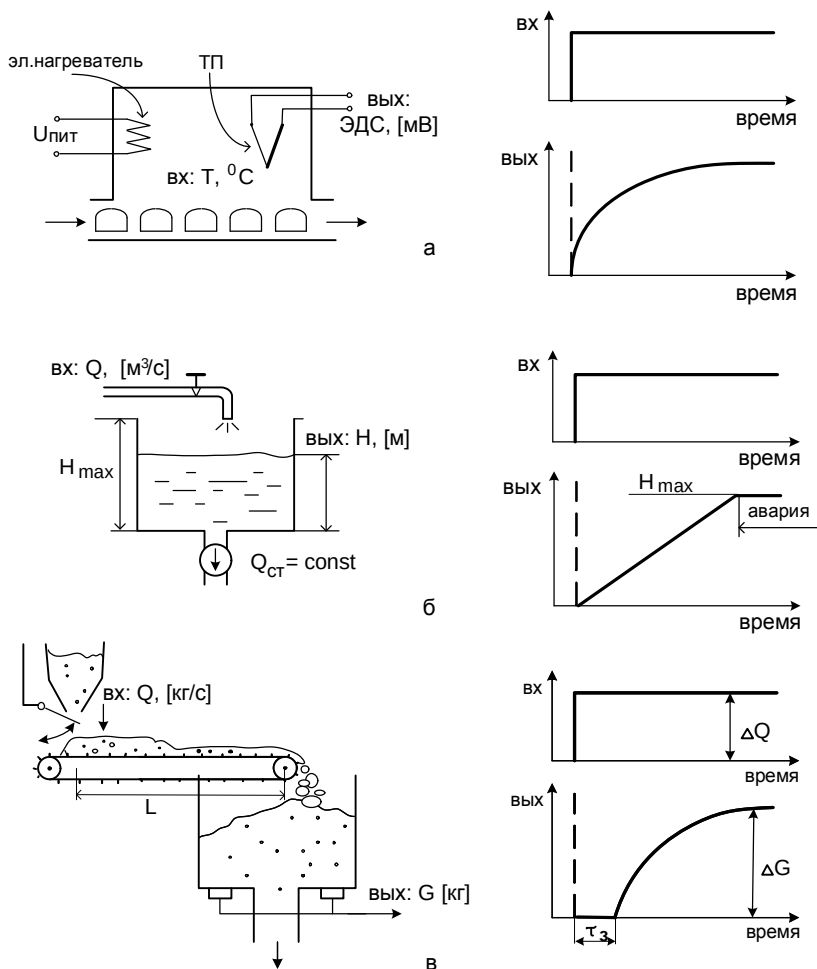


Рис. 1. Объект с самовыравниванием (а), без самовыравнивания (б) и объект без самовыравнивания с запаздыванием

Все ОУ можно разделить на объекты с запаздыванием (рис. 1, в) и без запаздывания. В объектах с запаздыванием регулируемая величина начинает изменяться не одновременно с изменением входной величины, как в предыдущих случаях, а через некоторое

время τ_3 , называемое *временем транспортного запаздывания*^{VIII}. На рис. 1, в изображен пример такого ОУ: в бункер по транспортеру поступает сыпучий материал. Масса сыпучего материала в бункере начнет изменяться не сразу после изменения расхода сыпучего материала в первом бункере, а лишь через время $\tau_3 = L/V_L$, где V_L – скорость движения транспортерной ленты длиной L .

Кривые разгона, полученные на промышленных объектах, отличаются от рассмотренных выше и имеют S-образный вид (рис. 2). Для количественной оценки динамических свойств объектов используются следующие параметры:

- τ_3 – *время запаздывания* – отрезок времени от начала возмущения $\tau = 0$ до момента начала изменения выходной величины с постоянной максимальной скоростью или до момента пересечения касательной к $y(t)$ в точке максимальной скорости $[dy/dt]_{\max}$ с осью времени.

- T_O – *постоянная времени (время разгона)* – время, в течение которого выходная величина переходит из одного установившегося состояния Y_1 в другое Y_2 , при условии изменения этой величины с постоянной максимально возможной скоростью $[\partial y/\partial t]_{\max}$ при подаче на вход ступенчатого воздействия. Время разгона характеризует инерционные свойства объекта.

- K_{OB} – *коэффициент передачи объекта* – число единиц измерения выходной величины, приходящихся на единицу входной величины (см. формулу (1) в лаб. раб. №1).

Иногда, особенно для теплоэнергетических объектов, вместо коэффициента передачи K_{OB} используют *коэффициент самовыравнивания* ρ , а вместо постоянной времени T_O используют параметр ε – *скорость разгона*:

$$\varepsilon = \frac{Y_\tau}{\tau_3 \cdot \Delta u}; \quad (5)$$

$$\rho = \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (6)$$

где Δu , Δy , Y_τ определены графически на рис. 2.

Соотношения между ρ и K_{OB} следующее:

$$\rho = \frac{1}{K_{OB}}. \quad (7)$$

^{VIII} Другое название этого параметра – время чистого запаздывания.

Соотношение между ε и T_o можно вывести из подобия треугольников ΔKLN и ΔPLO (см. рис. 2):

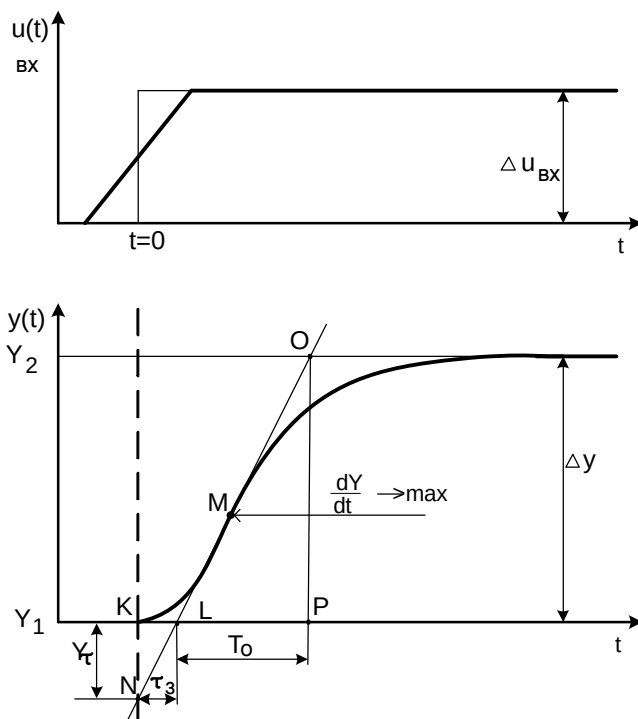


Рис. 2. Вид кривой разгона ОУ

$$\frac{\tau_3}{T_o} = \frac{Y_r}{\Delta y} \Rightarrow Y_r = \frac{\tau_3 \cdot \Delta y}{T_o}.$$

Подставив получившееся выражение в формулу (5), получим:

$$\varepsilon = \frac{\Delta y}{\Delta u \cdot T_o} = \frac{K_{OB}}{T_o}. \quad (8)$$

1.2. Составление динамической модели исследуемого объекта управления

Если кривая разгона ОУ имеет S-образный вид, то такой объект можно представить последовательным соединением двух инерционных звеньев первого порядка с постоянными времени T_1 и T_2 . Структурная схема такого соединения показана на рис. 3.

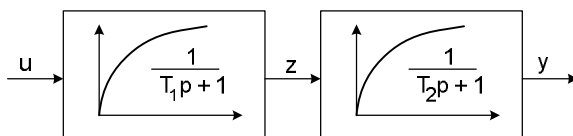


Рис. 3. Структурная схема ОУ с самовыравниванием

Передаточная функция последовательного соединения двух инерционных звеньев первого порядка имеет вид

$$W(p) = \frac{1}{(T_1 \cdot p + 1)(T_2 \cdot p + 1)} \quad (9)$$

Для определения параметров T_1 и T_2 по экспериментальной кривой разгона можно воспользоваться *методом Орманса*. Последовательность шагов для определения значений T_1 и T_2 следующая:

а) Экспериментальная кривая разгона нормируется, т.е. весь диапазон от Y_1 до Y_2 (см. рис. 2) принимается за единицу и по необходимости начало оси времени смещается вправо на величину *транспортного (чистого) запаздывания* $\tau_{тр.}$

б) По нормированной кривой разгона определяется время, соответствующее значению $Y_7 = 0,7$ и обозначается как t_7 .

в) Полученный интервал делиться на три части, определяется точка $t_H = t_7/3$. Из точки t_H поднимается перпендикуляр до кривой разгона и определяется величина $Y_H = y(t_H)$.

г) Постоянная времени объекта определяется с помощью вспомогательной величины Z^* , для нахождения которой используется номограмма, представленная на рис. 4.

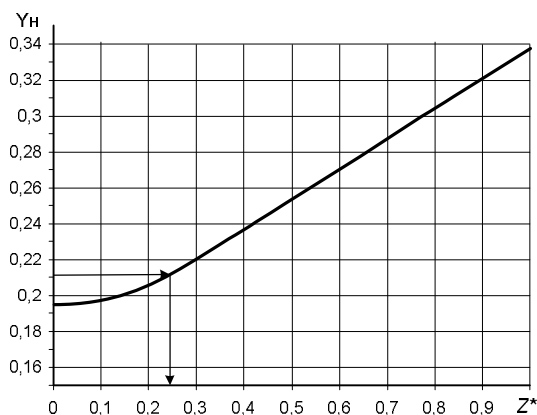


Рис. 4. Номограмма для определения величины Z^*

д) Затем величины T_1 и T_2 рассчитываются по формулам

$$T_1 = \frac{t_7}{2,4}(1+Z^*) \quad \text{и} \quad T_2 = \frac{t_7}{2,4}(1-Z^*). \quad (10)$$

Пример определения параметров ОУ приведен на рис. 5, где показаны шаги по определению t_7 и t_H по экспериментальной кривой разгона, изображенной точками. Получили значение $t_7 = 28$ с, а значит, $t_H = 9,3$ с и по нормированному графику определяем $Y_H = 0,212$. В соответствии с номограммой рис. 5 вспомогательная величина $Z^* = 0,24$. Постоянными времени ОУ равны $T_1 = 14,5$ и $T_2 = 8,9$ с. Сплошной линией показана расчетная траектория изменения выходной величины по формуле

$$y_{PAC}(t) = 1 + \frac{T_1}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t-\tau_{Tp}}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t-\tau_{Tp}}{T_2}}, \quad \text{при} \quad t > \tau_{Tp}. \quad (11)$$

При $t \leq \tau_{Tp}^{IX}$ принять $y(t) = 0$.

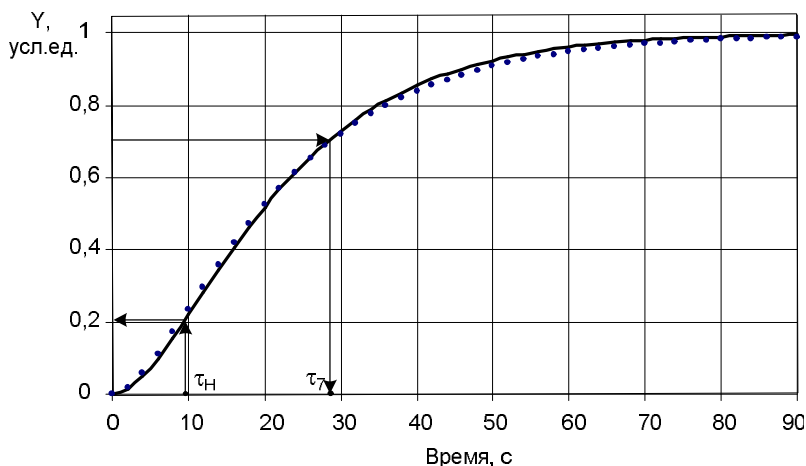


Рис. 5. Построение кривой разгона методом Орманса:
 экспериментальная; — расчетная кривая разгона

В некоторых случаях, когда значение величины Y_H оказывается меньше 0,19, воспользоваться номограммой невозможно. В таком

^{IX} Если транспортного запаздывания в ОУ нет, то $\tau_{Tp} = 0$.

случае следует использовать другие методы. Например, метод наименьших квадратов, или, если это допустимо, увеличить время транспортного запаздывания и сместить начало оси времени правее либо перейти к модели объекта первого порядка с запаздыванием (рис. 6).

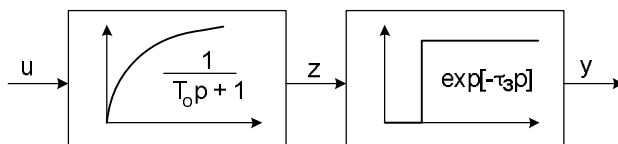


Рис. 6. Структурная схема ОУ с самовыравниванием и запаздыванием

ПФ и переходная характеристика последовательного соединения инерционного звена первого порядка и звена запаздывания:

$$W(p) = \frac{1}{(T_o \cdot p + 1)} \cdot e^{-\tau_3 \cdot p}; \quad (12)$$

$$y_{ПАСЧ}(t) = 1 - \exp\left[-\frac{t - \tau_3}{T_o}\right], \quad \text{при } t > \tau_3. \quad (13)$$

При $t \leq \tau_3$ принять $y(t) = 0$.

2. Порядок выполнения работы

1. Подготовить рабочий журнал наблюдений (см. таблицу).

Экспериментальные данные

Время, с	0	5	10	...	...
U, % хода ИМ					
Y, ед. регулируемой величины					

2. Включить лабораторный стенд – загорится лампочка «Работа включена». С помощью универсального переключателя УП-1 перевести САР в ручной режим (положение «Руч.»).

3. С помощью другого УП-2 и положений больше «>» и меньше «<» установить положение вала ИМ на 40–50% хода вала ИМ (U_1) и дождаться достижения выходной величиной установившегося значения.

4. Увеличить положение вала ИМ на 15–20% хода. Зафиксировать в журнале время хода ИМ из начального состояния U_1 в конечное U_2 и величину входного воздействия $\Delta U = U_2 - U_1$.

5. С момента изменения положения вала ИМ фиксировать по шкале вторичного прибора изменение во времени выходного параметра через каждые 5–10 с, занося данные в журнал наблюдений.

6. Используя полученные значения, построить график траектории кривой разгона объекта. Примерный вид кривой разгона показан на рис. 2.

7. Графическим методом определить динамические параметры объекта: τ_3 , T_0 , $K_{об}$, ρ , ε .

8. Используя метод Орманса определить постоянные времени T_1 и T_2 , представив объект в виде последовательного соединения двух звеньев (см. рис. 3, 6).

9. Построить расчётную кривую на одном графике с экспериментальной кривой разгона. Сравнить полученные результаты, сделать выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое передаточная функция объекта?
2. Как подразделяются ОУ по виду кривых разгона?
3. Какие количественные оценки динамических свойств объекта вы знаете? Приведите формулы.
4. В чем заключается метод Орманса? Для каких объектов он применим?
5. Какой режим САУ называется динамическим?
6. Что называется уравнением динамики? Каков его вид?
7. Запишите линеаризованное уравнение динамики в обычной и в операторной формах.
8. Запишите линеаризованное уравнение динамики с использованием ПФ. Справедлива ли эта запись при ненулевых начальных условиях? Почему?
9. Напишите выражение для ПФ по известному уравнению динамики: $0,1y'(t) + y(t) = 9,7u(t)$.
10. Что называется характеристическим полиномом звена?
11. Что называется нулями и полюсами передаточной функции?
12. Что называется переходной характеристикой?
13. Что такое кривая разгона и как её получить?

Лабораторная работа №3

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕГО ПАРАМЕТРОВ ПО ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ

Цель работы: изучить характеристики объектов, научиться экспериментально определять параметры объекта по импульсной характеристике.

1. Общие сведения

1.1. Общие сведения о характеристиках объекта

Импульсная характеристика, как и кривая разгона, используется для определения параметров и составления математической модели ОУ. Импульсную характеристику используют в том случае, если по технологии недопустимо подвергать ОУ длительным возмущающим воздействиям, например, на астатических объектах.

Импульсная характеристика $g(t)$ описывает реакцию звена на единичное импульсное воздействие при нулевых начальных условиях. Единичный импульс физически представляет из себя очень узкий импульс, ширина которого стремится к нулю, а высота – к бесконечности, ограничивающий единичную площадь. Математически он описывается дельта-функцией $\delta(t) = 1'(t)$.

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t \neq 0 \\ \infty, & \text{при } t = 0 \end{cases}; \quad \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1. \quad (1)$$

Примерное изображение дельта-функции и импульсной характеристики для объектов с самовывравниванием (рис. 1, а) и без самовывравнивания (рис. 1, б):

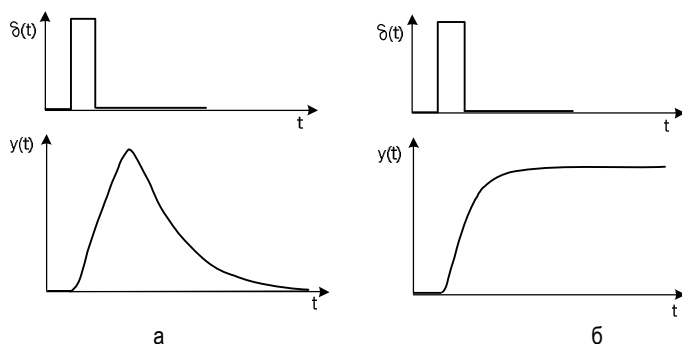


Рис. 1. Импульсная характеристика

Импульсную характеристику можно найти математически по ПФ, выполнив обратное преобразование Лапласа, либо продифференцировав переходную функцию:

$$g(t) = L^{-1}\{W(p)\} = \frac{dh(t)}{dt}. \quad (2)$$

Важную роль при описании линейных систем играют частотные характеристики. Если на вход линейной САУ подать синусоидальное воздействие вида

$$u(t) = A \sin(\omega t) \quad \text{или} \quad u(t) = A e^{j\omega t},$$

то по истечении некоторого времени (когда закончатся все движения, определяемые переходными процессами) на выходе звена установится также гармоническое изменение выходной величины с той же частотой, которую имеет входная, но с иными амплитудами и фазой:

$$y(t) = B \sin(\omega t + \varphi) \quad \text{или} \quad u(t) = B e^{j(\omega t + \varphi)} = B e^{j\omega t} e^{j\varphi},$$

где A, B – амплитуда входного и выходного сигналов; $\omega = 2\pi / T$ – угловая частота; $e^{j\omega t} = \cos \omega t + j \sin \omega t$ – единичный вектор; t – время; T – период входного сигнала, $j = \sqrt{-1}$; φ – фазовый сдвиг выходного сигнала относительно входного.

Амплитуда и фаза выходных колебаний будут зависеть от частоты входного воздействия. Такие зависимости называют *частотными характеристиками* (ЧХ).

Частотная характеристика $W(j\omega)^X$ – отношение выходного сигнала к входному сигналу, если оба они изменяются гармонически. ЧХ определяет взаимозависимость спектров выходного и входного сигналов. ЧХ можно получить заменив в передаточной функции $W(p)$ преобразователь Лапласа p на $j\omega$:

$$W(j\omega) = \frac{y(t)}{u(t)} = \frac{B(\omega)}{A(\omega)} e^{j\varphi}. \quad (3)$$

Модуль ЧХ может быть представлен вектором на комплексной плоскости, как это показано на рис. 2. При непрерывном изменении частоты происходит изменение положения и длины вектора $W(j\omega)$. Конец вектора описывает на комплексной плоскости некоторую

^X Полное название – амплитудно-фазочастотная характеристика АФЧХ.

кривую, называемую годографом. *Годограф* – это геометрическое место точек конца вектора АФЧХ на комплексной плоскости при изменении частоты от 0 до ∞ . Значения частот можно записывать непосредственно на годографе.

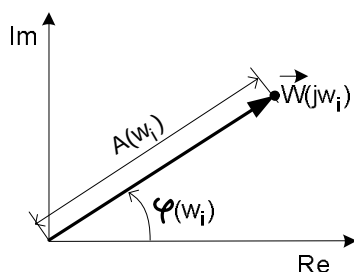


Рис. 2. Вектор АФЧХ на комплексной плоскости

Для определения модуля и фазы ЧХ на заданной частоте следует соответствующую точку годографа соединить прямой с началом координат. Длина полученного отрезка соответствует модулю $A(w_i) = |\vec{W}(jw_i)|$ АФЧХ на данной частоте w_i и называется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ). *Амплитудно-частотная характеристика* $A(w)$ – зависимость модуля АФЧХ от частоты – определяется как отношение амплитуд выходного и входного сигналов:

$$A(w) = \left| \vec{W}(jw) \right| = \frac{B(w)}{A(w)} \quad (4)$$

Угол, образованный полученным вектором (рис. 3) с положительной вещественной осью, является фазой АФЧХ и называется фазочастотной характеристикой (ФЧХ). *Фазочастотная характеристика* $\varphi(w)$ – зависимость фазы АФЧХ от частоты – показывает насколько «отстает» выходной сигнал относительно входного.

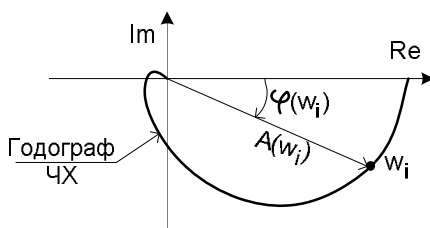


Рис. 3. Амплитудно-фазовая частотная характеристика (ЧХ)

Эти характеристики связаны между собой и вектором ЧХ следующей зависимостью:

$$W(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}. \quad (5)$$

Другой формой представления частотных характеристик является *логарифмическая амплитудно-частотная характеристика* $L(\omega)$ (ЛАЧХ) и *логарифмическая фазовая частотная характеристика* $\varphi(\omega)$ (ЛФЧХ):

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega). \quad (6)$$

ЛФЧХ свой вид не меняет и откладывается по оси ординат в радианах или угловых градусах. Для логарифмических характеристик по оси абсцисс откладывается частота в логарифмическом масштабе, что позволяет отложить на заданном отрезке значительный диапазон частот. При этом вводятся две единицы измерения: декада – длина отрезка, соответствующего десятикратному изменению частоты входного сигнала; октава – длина участка оси частот, соответствующая двукратному изменению частоты. Ордината ЛАЧХ откладывается в децибелах.

Использование логарифмического масштаба обусловлено не только значительными изменениями модуля ЧХ, но и упрощением расчетов результирующих ЧХ в САУ. Частотные характеристики являются исчерпывающими характеристиками ОУ. Зная ЧХ ОУ, можно восстановить его передаточную функцию и определить параметры.

1.2. Перестроение импульсной характеристики в кривую разгона

В идеальном случае импульсное воздействие имеет вид прямоугольника и тогда его можно представить как алгебраическую сумму двух равных по величине и противоположных по направлению однократных скачкообразных возмущений в моменты времени t_1 и t_2 соответственно:

$$\delta(t) = 1(t_1) - 1(t_2),$$

где $t_{\text{имп}} = t_2 - t_1$ – продолжительность импульсного воздействия, (рис. 4).

Теоретически подобным образом можно любое входное воздействие разложить на сумму простейших скачкообразных воздействий, и изменение выходной величины определять как сумму реакций звена на эти простейшие воздействия. Например, чтобы определить траекторию изменения выходного сигнала

во времени при подаче на вход импульса продолжительностью $t_{\text{имп}}$ необходимо:

$$y(t) = y_{\Pi}(t) - y_{\Pi}(t - t_{\text{имп}}),$$

где $y_{\Pi}(t)$ – переходная характеристика объекта; $y_{\Pi}(t - t_{\text{имп}})$ – та же характеристика, но смещенная по оси времени вправо на время $t_{\text{имп}}$.

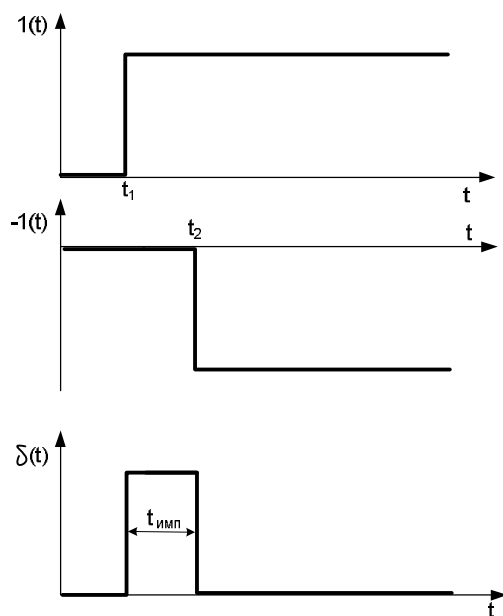


Рис. 4. Представление импульсной характеристики

Для преобразования импульсную характеристику $y(t)$ разбивают по времени на 4–5 равных участков Δt , каждый из которых равен продолжительности импульсного входного возмущающего воздействия $t_{\text{имп}}$ (рис. 5) ($i = 4$). С целью повышения точности построения кривой разгона разобьем каждый интервал Δt на 10 и более мелких интервалов времени^{ХІ} Δt_{ij} ($j = 10$).

На первом участке Δt_1 (см. рис. 5) траектория импульсной характеристики совпадает с траекторией кривой разгона. На втором участке Δt_1 ординаты $y_{\Pi}(t)$ получаем суммируя соответствующие

^{ХІ} Для удобства иллюстрации метода каждый интервал на рисунке разбит лишь на 4 части.

ординаты первого и второго участков разбиения импульсной характеристики:

$$\begin{aligned}
 y_{\Pi}(t_{21}) &= y(t_{11}) + y(t_{21}) = a_1 + a_2; \\
 y_{\Pi}(t_{22}) &= y(t_{12}) + y(t_{22}) = b_1 + b_2; \\
 y_{\Pi}(t_{23}) &= y(t_{13}) + y(t_{23}) = c_1 + c_2; \\
 y_{\Pi}(t_{24}) &= y(t_{14}) + y(t_{24}) = d_1 + d_2.
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

На третьем участке разбиения Δt_3 ординаты $y_{\Pi}(t)$ получаем суммируя соответствующие ординаты второго участка $y_{\Pi}(t)$ и третьего участка импульсной характеристики:

$$\begin{aligned}
 y_{\Pi}(t_{31}) &= y_{\Pi}(t_{21}) + y(t_{31}) = (a_1 + a_2) + a_3; \\
 y_{\Pi}(t_{32}) &= y_{\Pi}(t_{22}) + y(t_{32}) = (b_1 + b_2) + b_3; \\
 y_{\Pi}(t_{33}) &= y_{\Pi}(t_{23}) + y(t_{33}) = (c_1 + c_2) + c_3; \\
 y_{\Pi}(t_{34}) &= y_{\Pi}(t_{24}) + y(t_{34}) = (d_1 + d_2) + d_3.
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

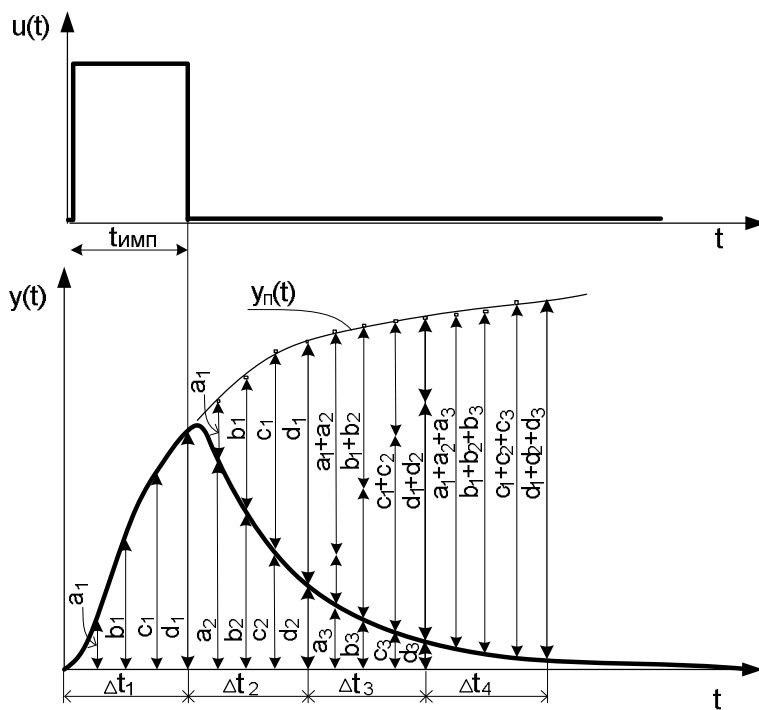


Рис. 5. Перестроение импульсной характеристики в кривую разгона $y_{\Pi}(t)$

На четвертом участке разбиения Δt_4 ординаты $y_{\Pi}(t)$ получаем суммируя соответствующие ординаты третьего участка $y_{\Pi}(t)$ и четвертого участка импульсной характеристики:

$$y_{\Pi}(t_{41}) = y_{\Pi}(t_{31}) + y(t_{41}) = (a_1 + a_2 + a_3) + a_4. \quad (9)$$

...и так далее для всех участков разбиения, пока не будет определено новое установившееся состояние.

Параметры объекта τ_3 , T_O и K_{OB} , ε , ρ можно определить обычным способом по перестроенной кривой разгона^{XII}, а можно и не используя графическое перестроение.

Коэффициент передачи объекта равен отношению площадей F_y и F_u , ограниченных траекториями изменения соответствующих сигналов (рис. 6):

$$K_{OB} = \frac{F_y}{F_u}. \quad (10)$$

Площади под графиками можно посчитать приближенным методом прямоугольников. Коэффициент самовывравнивания определяется из условия

$$\rho = \frac{F_y}{F_u} \quad (11)$$

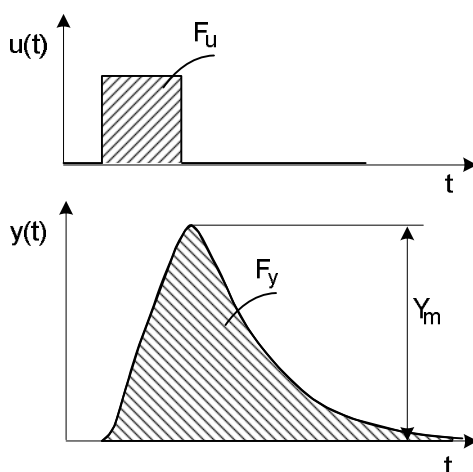


Рис. 6. Импульсная характеристика ОУ

^{XII} Методика подробно описана в лабораторной работе №2.

Постоянная времени объекта T_O определяется в соответствии с условием

$$T_O = \frac{F_y}{Y_m} \quad (12)$$

где Y_m – максимальное отклонение выходной величины от начального значения при определении импульсной характеристики.

Скорость разгона определяется из условия

$$\varepsilon = \frac{Y_m}{F_u}. \quad (13)$$

При экспериментальном определении динамических характеристик входное возмущающее воздействие должно вноситься мгновенно. Полностью выполнить это требование в реальных производственных условиях невозможно. Используемые на практике ИМ постоянной скорости не позволяют обеспечить требуемую (мгновенную) скорость изменения входного воздействия.

Критерием выбора амплитуды и продолжительности возмущающего импульса является способность инерционного объекта реагировать на возмущающее воздействие.

2. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить введение к лабораторной работе.
2. Включить лабораторную установку, при включении загорается сигнальная лампа «Работа включена».
3. Снять кривую разгона ОУ (см. выполнение лаб. раб. №2).
4. По полученным экспериментальным данным построить график кривой разгона и по графику определить параметры ОУ (см. лаб. раб. №2).
5. Снять импульсную характеристику объекта. Для этого необходимо с помощью переключателя УП-2 установить положение вала ИМ на 40–50% хода; дождаться окончания переходного процесса.

Быстро увеличить положение вала ИМ на 15–20% хода, зафиксировав в журнале величину входного возмущения. Подождать немного^{XIII}, потом уменьшить значение входного сигнала до первоначального положения в 40–50%. С момента изменения положения вала ИМ в большую сторону фиксировать через каждые 5 с по шкале вторичного прибора изменение во времени выходного параметра до окончания переходного процесса, занося данные в журнал наблюдений.

^{XIII} Промежуток времени импульса выбрать приблизительно равным постоянной времени ОУ или меньше.

6. На том же графике, где начерчена кривая разгона, по полученным экспериментальным данным построить импульсную характеристику объекта. По импульсной характеристике определить параметры ОУ (см. формулы (10)–(13)).

7. Сравнить результаты определения параметров ОУ по кривой разгона и импульсной характеристике. Сделать выводы о величинах ошибки при определении динамических параметров различными способами.

8. Перестроить импульсную характеристику в кривую разгона в соответствии с методикой, описанной в подразд. 1.2 лабораторной работы.

9. Сравнить экспериментальную кривую разгона с перестроенной по пункту 8. Сделать выводы по работе.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется импульсной характеристикой?
2. Какие частотные характеристики знаете?
3. Как получить частотные характеристики опытным путем?
4. Как получить частотные характеристики, если известна передаточная функция звена?
5. Как построить годограф АФЧХ?
6. Какие типовые входные воздействия Вы знаете? Для чего они нужны?
7. Как по импульсной характеристике определить параметры ОУ?
8. Как получить кривую переходного процесса при сложной форме входного воздействия, если известна переходная характеристика звена?

Лабораторная работа №4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРОМ

Цель работы: изучить показатели качества систем управления, изучить работу САУ в автоматическом режиме и определить показатели качества работы системы.

1. Общие сведения

Наибольшее распространение получили одноконтурные замкнутые системы регулирования с принципом управления по отклонению регулируемой величины от задания. Структурная схема такой системы представлена на рис. 1.

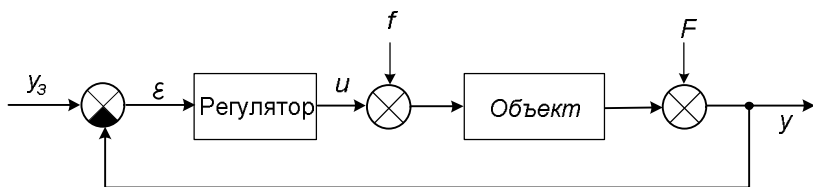


Рис. 1. Структурная схема САУ

На САУ воздействуют два вида возмущающих воздействий:

- задающее воздействие X_3 ;
- возмущающие воздействия, которые можно разделить на низкочастотные f и высокочастотные (шумы) F . Возмущения со стороны нагрузки на технологический объект, которые проявляются в виде произвольных изменений температур, давлений, состава и концентраций веществ и т.п.

В связи с этим система управления должна удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечивать устойчивое управление во всем диапазоне изменения технологических параметров;
- с максимальной точностью и быстродействием обрабатывать сигнал задания: $Y(t) = Y_3(t)$;
- по возможности быстро реагировать на возмущения $f(t)$ и $F(t)$ и компенсировать их, т.е. ошибка регулирования $\varepsilon(t) = Y_3 - Y(t)$ под действием возмущений должна быть минимальной.

Чем выше требования к качеству регулирования, тем сложнее будет система.

Качество работы САУ является одной из важнейших её характеристик. Для оценки уровня качества работы системы в ТАУ введены количественные оценки качества. Получить общую оценку качества в виде функциональной зависимости от множества структурных, технических и эксплуатационных характеристик системы достаточно сложно. Поэтому о качестве САУ судят в первую очередь по запасу устойчивости и виду переходного процесса в системе.

Под *устойчивостью САУ* подразумевается её свойство возвращаться в исходное состояние после вывода ее из этого состояния (или останавливаться в одном из состояний) после прекращения влияния задающего Y_3 , или возмущающего F , или f воздействий. Иначе говоря, затухание переходных процессов в системе является необходимым требованием качественной системы, но недостаточным условием практической пригодности.

К автоматическим системам регулирования предъявляются требования не только устойчивости процессов регулирования во

всем диапазоне нагрузок на объект. Для работоспособности системы не менее необходимо, чтобы процесс автоматического регулирования осуществлялся при обеспечении определенных *качественных показателей*. Такими показателями являются (рис. 2):

- статическая ошибка регулирования e_0 ;
- время регулирования τ_{P2} ;
- время первого достижения заданного значения τ_{P1} ;
- перерегулирование σ ;
- степень затухания колебаний Ψ .

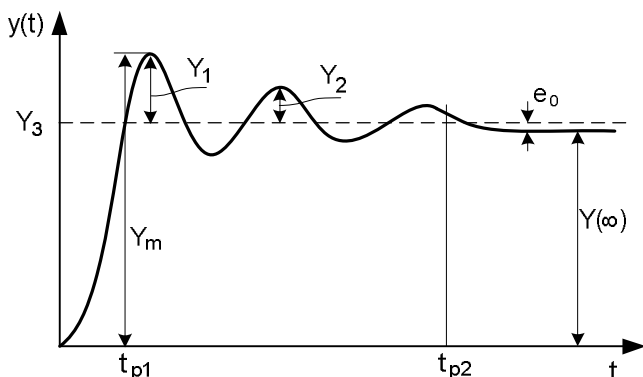


Рис. 2. Переходный процесс по заданию

В промышленных САУ оценки показателей качества переходных процессов обычно определяют по экспериментальной траектории переходного процесса регулирования при возмущении по заданию.

Время первого достижения регулируемой величиной заданного значения τ_{P1} оценивает качество регулирования системы относительно задающего воздействия и определяется как интервал времени от начала переходного процесса до момента, когда регулируемая величина впервые достигнет заданного значения Y_3 .

Время регулирования τ_{P2} характеризует быстродействие системы. Определяется τ_{P2} как интервал времени от начала переходного процесса до момента его окончания. Переходный процесс считают оконченным, если отклонение управляемой величины от его нового установившегося значения становится меньше или равно *допустимой ошибке регулирования* $|Y_3 - Y(t)| \leq \varepsilon^*$. Величину ε^* обычно принимают равной $\pm 2\%$ от величины скачка по сигналу задания.

Статическая ошибка регулирования $e_0 = Y_3 - Y(t)$ – отклонение регулируемой величины от заданного значения по окончании переходного процесса.

Динамическая ошибка регулирования характеризуется показателем *перерегулирование* σ – это максимальное отклонение выходной величины в переходном режиме Y_m от нового установившегося значения $Y(\infty)$, выраженное в процентах:

$$\sigma = \frac{Y_m - Y(\infty)}{Y(\infty) - Y(0)} \cdot 100\% . \quad (1)$$

Системы с перерегулированием в пределах от 10 до 30% встречаются чаще всего. В случае, если анализируется переходный процесс по возмущению, то перерегулирование считается иначе (рис. 3):

$$\sigma = \frac{Y_v}{Y_m} \cdot 100\% . \quad (2)$$

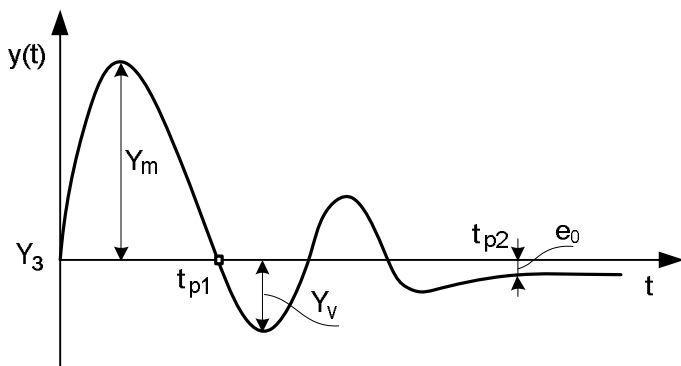


Рис. 3. Переходный процесс по возмущению

Степень затухания Ψ определяется как отношение разности двух соседних амплитуд колебаний (последовательных колебаний одного знака) к первой из них:

$$\Psi = \frac{Y_1 - Y_2}{Y_1} = 1 - \frac{Y_2}{Y_1} \quad (3)$$

Степень затухания колебаний показывает во сколько раз уменьшается амплитуда второго колебания по сравнению с первым.

Переходные процессы в системах регулирования можно разделить на три вида:

1) Аperiodический процесс (рис. 4). В этом случае величина перерегулирования равна нулю, а время достижения выходной величины задания равно времени регулирования:

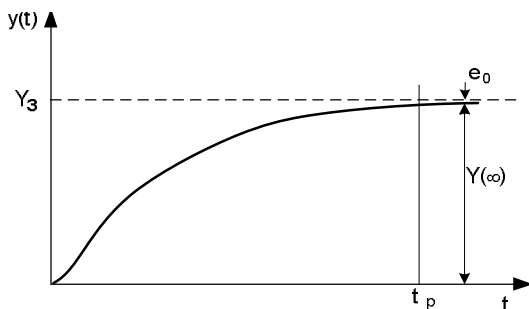


Рис. 4. Аperiodический переходный процесс по заданию

2) Периодический процесс с затухающими колебаниями. Это самый распространенный вид процессов большинства промышленных САУ. В этом случае сохраняется достаточно высокое быстродействие системы при наличии нескольких колебаний.

3) Периодический (колебательный) процесс с незатухающими (медленно затухающими) колебаниями (рис. 5). Такой процесс характерен для САУ с позиционными регуляторами. Либо неудачно подобраны настройки типового регулятора и система находится вблизи границы устойчивости.

Для процессов с установившимися колебаниями дополнительно определяют *период* T_K и *амплитуду* A_K установившихся колебаний.

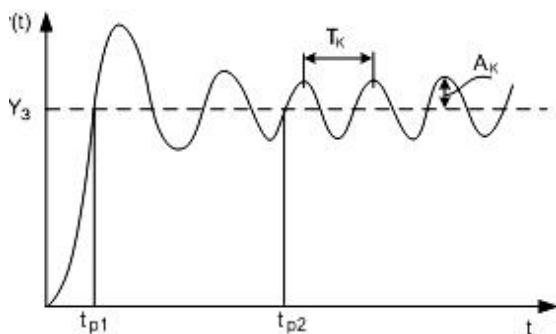


Рис. 5. График процесса с незатухающими колебаниями

2. Порядок выполнения работы

1. Включить лабораторную установку, при включении загорается сигнальная лампа «Работа включена».
2. Переключить систему в автоматический режим управления с помощью УП-2 положение «Авт.».
3. Установить задатчик на $1/3$ диапазона изменения выходной величины^{XIV}. Дождаться окончания переходного процесса. Зафиксировать в журнале наблюдения начальные значения регулируемого параметра Y и положение вала ИМ.
4. Увеличить задание на 10–20%. Фиксировать в журнале наблюдений каждые 5–10 с значения выходной и входной величины (положение вала ИМ) до тех пор пока выходное значение не перестанет изменяться.
5. Построить графики переходных процессов один под другим с осями: 1) время – входная величина; 2) время – выходная величина. Определить показатели качества САУ.
6. Уменьшить задание на 10–20%. Фиксировать в журнале наблюдений каждые 5–10 с значения выходной и входной величины до тех пор пока выходное значение не перестанет изменяться.
7. Построить графики переходных процессов один под другим с осями: 1) время – входная величина; 2) время – выходная величина. Определить показатели качества САУ для второго процесса.
8. Сравнить переходные процессы в САУ при увеличении и уменьшении задания. Сделать выводы по работе.

Вопросы для самопроверки

1. Какая система автоматического управления называется устойчивой?
2. Объясните принцип работы САУ по её структурной схеме.
3. Какие показатели применяют для оценки качества колебательных процессов?
4. Какие показатели характеризуют динамические режимы работы САУ?
5. Что называется быстродействием САУ?
6. Какие тестовые сигналы используются для сравнения качественных показателей работы САУ в динамических режимах?
7. Что называется перерегулированием в переходном процессе?

^{XIV} Определить самостоятельно по статической характеристике объекта.

Лабораторная работа №5

ИЗУЧЕНИЕ ТИПОВЫХ ЗАКОНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЕК РЕГУЛЯТОРА САУ

Цель работы: изучить типовые законы регулирования, методики определения оптимальных параметров настройки регуляторов по динамическим параметрам объекта.

1. Общие сведения

1.1. Общие сведения о типовых законах регулирования

Задача проектировщика САУ состоит в выборе такого типа регулятора, который при минимальной стоимости и максимальной надежности обеспечивал бы заданное качество регулирования. При проектировании системы можно выбрать релейные, непрерывные или цифровые типы регуляторов. Для того чтобы выбрать тип регулятора и определить его настройки, необходимо знать:

- статические и динамические характеристики ОУ;
- требования к качеству процесса регулирования;
- характер возмущений, действующих на процесс.

В качестве серийных предполагаются непрерывные регуляторы, реализующие И-, П-, ПИ- и ПИД-законы управления. Теоретически, с усложнением закона регулирования качество работы системы улучшается.

Применяемые в настоящее время в металлургическом производстве автоматические регуляторы, как правило, относятся к устройствам непрерывного действия. Это значит, что между входными и выходными параметрами регулятора существует непрерывная функциональная связь.

Входным параметром регулятора является сигнал рассогласования между заданным и действительным значением регулируемого параметра. Обычно сигнал рассогласования называют сигналом ошибки регулирования. Выходной величиной регулирующего устройства являются командные импульсы, управляющие работой исполнительного механизма (ИМ), перемещающего регулируемый орган (РО). Поэтому наиболее удобно выходную величину регулятора оценивать в процентах хода вала ИМ.

Между входной и выходной величинами регулятора существует определенная функциональная связь во времени. Эта функциональная связь называется *законом регулирования*.

Автоматический регулятор состоит из задающего устройства, сравнивающего устройства, усилительно-преобразующего устройства и блока настроек регулятора. Качество работы регулятора при выбранном законе регулирования зависит от значений *параметров динамической настройки регулятора*, входящих в виде постоянных коэффициентов в уравнения и определяющие закон регулирования. Величины динамических параметров настройки регулятора должны соответствовать динамическим параметрам объекта. Правильный выбор коэффициентов регулятора является главной задачей технологической наладки контура регулирования.

1.1.2. Пропорциональные регуляторы (П-регуляторы)

П-регуляторы реализуют пропорциональный закон регулирования в соответствии с выражением

$$u(t) = K_p \cdot \varepsilon(t), \quad (1)$$

где $u(t)$ – управляющее воздействие; $\varepsilon(t) = y_z(t) - y(t)$ сигнал рассогласования, иначе говоря, отклонение выходной величины $y(t)$ от заданного значения. Передаточная функция П-регулятора: $W_{II}(p) = K_p$.

Отличительной особенностью П-регулятора является пропорциональность угла поворота вала ИМ величине отклонения регулируемого параметра от задания. Регулятор характеризуется наличием жесткой ОС по положению вала ИМ. Для реализации этой обратной связи в ИМ дополнительно встраивается датчик контроля положения выходного вала.

Пропорциональный регулятор имеет один параметр динамической настройки – *коэффициент передачи регулятора* K_p . Последний численно равен углу поворота вала ИМ, приходящегося на единицу отклонения регулируемого параметра от задания:

$$K_p = \frac{\Delta u}{\Delta \varepsilon} \left[\frac{\% \text{хода}}{\text{ед. изм. регулir. величины}} \right]. \quad (2)$$

П-регулятор обеспечивает быстрое регулирование, но в системе присутствует статическая ошибка. При увеличении параметра настройки регулятора K_p статическая ошибка уменьшается, но уменьшается и устойчивость системы. Поэтому в системах промышленного типа в чистом виде П-регулятор используется редко.

1.1.3. Интегральные регуляторы (И-регуляторы)

Эти регуляторы реализуют интегральный закон регулирования и иногда называются астатическими. Зависимость между выходной и входной величинами И-регулятора имеет следующий вид:

$$u(t) = K_{II} \int_0^t \varepsilon(t) dt \quad \text{или} \quad \frac{du(t)}{dt} = K_{II} \cdot \varepsilon(t). \quad (3)$$

Передаточная функция И-регулятора $W_{II}(p) = K_{II} / p$.

Отличительная особенность интегрального регулятора: скорость перемещения вала ИМ пропорциональна отклонению регулируемого параметра от задания.

Динамическим параметром настройки И-регулятора является коэффициент передачи K_{II} . Этот коэффициент численно равен величине скорости перемещения РО (вала ИМ), приходящейся на единицу отклонения регулируемого параметра от задания:

$$K_{II} = \frac{du/dt}{\varepsilon} \left[\frac{\% \text{хода}}{\text{ед. изм. регулир. величины}} \right]. \quad (4)$$

Иногда вместо параметра K_{II} используют настроечный параметр $T_{II} = 1/K_{II}$ – *время интегрирования* – это время, за которое выходная величина, изменяясь с постоянной скоростью, достигнет значения входной величины.

При использовании И-регулятора система становится астатической, т.е. статическая ошибка отсутствует. Однако сильно увеличивается время регулирования, по сравнению с П-регулятором, и переходные процессы очень затянуты.

1.1.4. Пропорционально-интегральные регуляторы (ПИ-регуляторы)

Иногда ПИ-регуляторы называются изодромными регуляторами с гибкой обратной связью. Гибкая ОС действует только в период переходного режима. Эти регуляторы сочетают свойства И- и П-регулятора и технически представляют собой параллельное соединение И- и П-регулятора.

Зависимость между входной и выходной величинами ПИ-регулятора определяется выражением

$$u(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_{II} \int_0^t \varepsilon(t) dt \quad \text{или} \quad u(t) = K_p \left(\varepsilon(t) + \frac{1}{T_{II}} \int_0^t \varepsilon(t) dt \right), \quad (5)$$

где T_{II} – *время изодрома* – время, за которое угол поворота ИМ под действием пропорциональной части удваивается интегральной.

$$T_{из} = \frac{K_P}{K_I} \frac{\Delta u / \Delta \varepsilon}{\Delta u / \Delta t \cdot \Delta \varepsilon} \Delta t.$$

Время изодрома $T_{из}$ численно характеризует среднюю скорость ИМ под действием интегральной части регулятора.

Кривая разгона ПИ-регулятора, работающего с ИМ постоянной скорости, представлена на рис. 1.

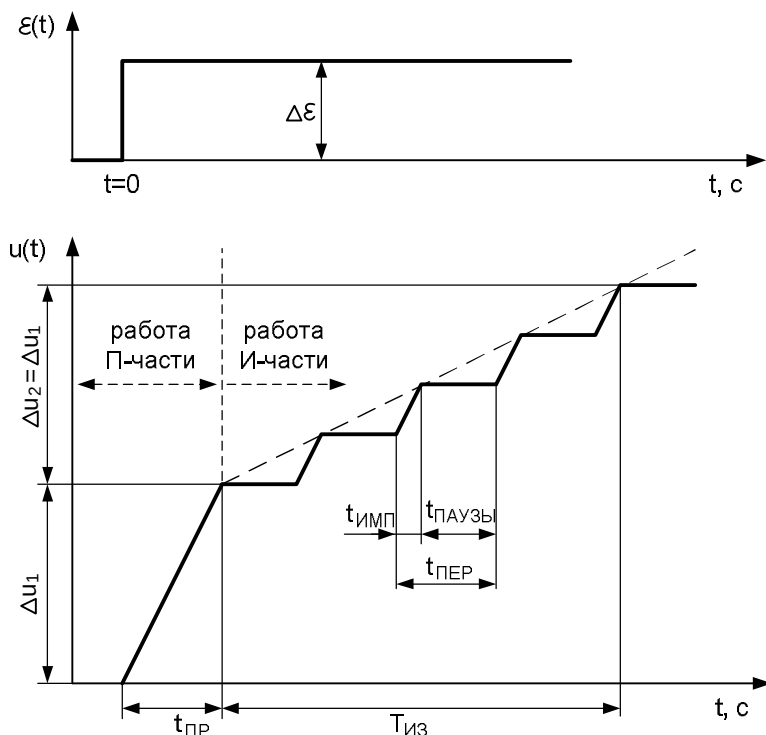


Рис. 1. Траектории изменения сигнала на входе и выходе ПИ-регулятора

ПИ-регулятор работает быстрее И-регулятора и без статической ошибки благодаря интегральной составляющей в законе регулирования. Он достаточно прост в настройке, так как настраиваются только два параметра. К достоинствам регулятора относится также малая чувствительность к шумам в канале измерения.

Благодаря этому ПИ-закон наиболее распространенный типовой закон регулирования.

1.1.5. Дифференциальные регуляторы (Д-регуляторы)

Д-регуляторы реализуют закон регулирования, чувствительный к скорости изменения входной величины, что позволяет системе более быстро реагировать на отклонения регулируемой величины от задания.

$$u(t) = K_D \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad \text{или} \quad u(t) = T_D \frac{d\varepsilon(t)}{dt}, \quad (6)$$

где T_D – время дифференцирования, параметр настройки Д-регулятора, это время, в течение которого входная величина, изменяясь с постоянной скоростью, достигнет значения выходной.

При постоянном входном сигнале ошибки $\varepsilon(t) = \text{const}$, когда скорость его изменения равна нулю, управляющее воздействие также будет равно нулю и объект окажется в неуправляемом режиме:

$$u(t) = T_D \frac{d\varepsilon(t)}{dt} = T_D \cdot 0 = 0.$$

Поэтому в чистом виде Д-регулятор не используют. Дифференциальную составляющую в законе регулирования применяют для улучшения качества регулирования в переходных режимах совместно с П-регулятором (ПД-регулятор) или с ПИ-регулятором (ПИД-регулятор).

Передаточная функция ПД-закона регулирования:

$$W(p) = K_P + K_D p.$$

На качество работы системы в установившихся режимах Д-часть никакого влияния не оказывает, поэтому при использовании ПД-регулятора присутствует статическая ошибка. При чрезмерном увеличении K_D качество системы в переходном режиме может ухудшиться.

1.1.6. Пропорционально-интегральные регуляторы с предварением (ПИД-регуляторы)

Для наиболее ответственных контуров используются ПИД-регуляторы, обеспечивающие наиболее высокое быстродействие в системе. Однако следует учитывать, что это условие выполняется только при его оптимальных настройках.

Реализуя ПИД-закон управления, при формировании управляющего сигнала, регулятор учитывает не только величину, но и

скорость изменения отклонения от задания. Зависимость между входной и выходной величинами ПИД-регулятора имеет вид:

$$u(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_{II} \int_0^t \varepsilon(t) dt + K_{II} \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (7)$$

$$\text{или } u(t) = K_p \left(\varepsilon(t) + \frac{1}{T_{II}} \int_0^t \varepsilon(t) dt + T_{II} \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right),$$

где T_{II} – *время предварения*, параметр настройки дифференциальной части ПИД-регулятора.

$$T_{II} = \frac{K_{II}}{K_p}.$$

Физически T_{II} – время, в течение которого угол поворота вала ИМ под действием дифференцирующей части удваивается пропорционально.

Данный регулятор имеет три параметра динамической настройки: K_p , T_{II} , T_{II} . Наличие дифференциальной части в ПИД-регуляторе повышает быстродействие системы и снижает ошибку регулирования в переходных режимах, но никак не сказывается на работе САУ в установившихся режимах.

Качество работы ПИД-регулятора для систем с большим запаздыванием становится сравнимо с качеством работы ПИ-регулятора. Кроме этого, наличие шумов в канале измерения в системе с ПИД-регулятором приводит к значительным случайным колебаниям управляющего сигнала регулятора, что увеличивает износ ИМ. Таким образом, ПИД-регулятор следует выбирать для систем регулирования с относительно малым уровнем шумов и величиной запаздывания в ОУ. Наиболее эффективно используются на технологических объектах, подверженных воздействию длительных монотонных возмущений. Примерами таких систем являются системы регулирования температуры.

1.2. Определение динамических параметров настройки регулятора по динамическим параметрам объекта

В реальных производственных условиях перед каждым инженером возникает задача оптимизации контура управления, которая заключается в том, что для каждого объекта с известными динамическими параметрами τ_z , T_O , K_{OB} необходимо определить значения параметров динамической настройки K_p , T_{II} , T_{II} регулятора, при которых максимально возможно компенсируется влияние инерционных свойств объекта.

Известно, что на динамику регулирования наибольшее влияние оказывает величина отношения запаздывания к постоянной времени объекта τ_3/T_{OB} .

Для практических инженерных целей широкое распространение получили различные приближенные методы определения динамических параметров настройки. Например, воспользоваться формулами, представленными в таблице.

Расчетные формулы для определения настроек регулятора для инерционного объекта с запаздыванием

Закон регулирования	Вид типового переходного процесса		
	Апериодический	20% перерегулирование	Минимум J'
Объекты с самовыравниванием (статические)			
И	$K_H = \frac{1}{4.2K_{OB} \cdot T_O}$	$K_H = \frac{1}{1.7K_{OB} \cdot T_O}$	$K_H = \frac{1}{1.7K_{OB} \cdot T_O}$
П	$K_P = \frac{0.3T_O}{K_{OB} \cdot \tau_3}$	$K_P = \frac{0.7T_O}{K_{OB} \cdot \tau_3}$	$K_P = \frac{0.9T_O}{K_{OB} \cdot \tau_3}$
ПИ	$K_P = \frac{0.6T_O}{K_{OB} \cdot \tau_3}$ $T_H = 0.6T_O$	$K_P = \frac{0.7T_O}{K_{OB} \cdot \tau_3}$ $T_H = 0.7T_O$	$K_P = \frac{T_O}{K_{OB} \cdot \tau_3}$ $T_H = T_O$
ПИД	$K_P = \frac{0.95T_O}{K_{OB} \cdot \tau_3}$ $T_H = 2.4\tau_3$ $T_{II} = 0.4\tau_3$	$K_P = \frac{1.2T_O}{K_{OB} \cdot \tau_3}$ $T_H = 2.0\tau_3$ $T_{II} = 0.4\tau_3$	$K_P = \frac{1.4T_O}{K_{OB} \cdot \tau_3}$ $T_H = 1.3\tau_3$ $T_{II} = 0.5\tau_3$
Объекты без самовыравнивания			
И	Не используют		
П	$K_P = \frac{0.4T_O}{\tau_3}$	$K_P = \frac{0.7T_O}{\tau_3}$	—
ПИ	$K_P = \frac{0.4T_O}{\tau_3}$ $T_H = 6\tau_3$	$K_P = \frac{0.7T_O}{\tau_3}$ $T_H = 3\tau_3$	$K_P = \frac{T_O}{\tau_3}$ $T_H = 4\tau_3$
ПИД	$K_P = \frac{0.6T_O}{\tau_3}$ $T_H = 5\tau_3$ $T_{II} = 0.2\tau_3$	$K_P = \frac{1.1T_O}{\tau_3}$ $T_H = 2\tau_3$ $T_{II} = 0.4\tau_3$	$K_P = \frac{1.4T_O}{\tau_3}$ $T_H = 1.6\tau_3$ $T_{II} = 0.5\tau_3$

В зависимости от технологических требований и характера действующих на объект возмущений наилучшим, как рекомендует традиционный метод, может быть признан один из трех типовых процессов регулирования (рис. 2):

1 – апериодический процесс с минимальным временем регулирования $\tau_p \rightarrow \min$;

2 – процесс с 20%-м перерегулированием (минимальное время максимального отклонения регулируемой величины от задания);

3 – минимальное значение квадратичного критерия

$$J' = \int_0^{\infty} x^2 d\tau \rightarrow \min.$$

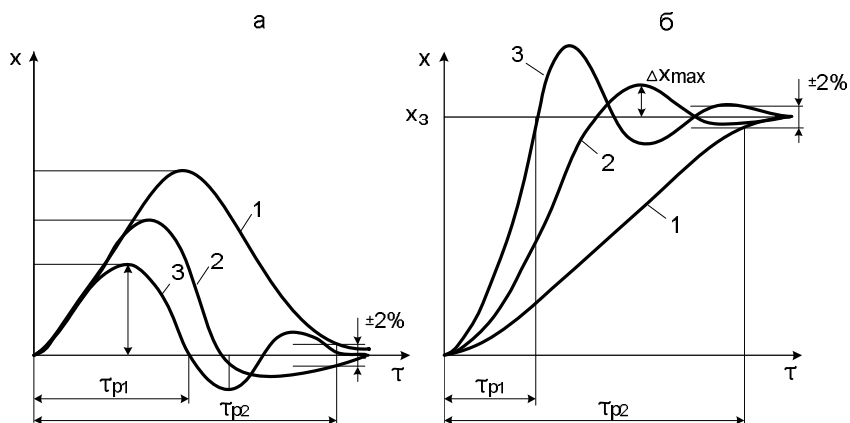


Рис. 2. Типовые переходные процессы:
а – при отработке внутреннего возмущения по нагрузке;
б – при скачкообразном изменении задания

Ещё один простой и точный метод определения оптимальных значений параметров динамической настройки регуляторов для инерционных объектов с запаздыванием – метод полной компенсации или *метод оптимума по модулю* (ОМ) передаточной функции. Сущность метода ОМ передаточной функции в том, чтобы модуль передаточной функции замкнутой системы $W_{3.c}(p)$ в как можно большей полосе частот (от $\omega = 0$ до ∞) был максимально приближен к единице. Оптимизация состоит в «пригонке» модуля $W_{3.c}(p)$ к единице для возможно большей полосы частот.

Метод ОМ обеспечивает определение оптимальных значений динамических параметров настройки в соответствии с условиями:

$$K_p = \frac{T_1}{2K_{OB} \cdot \tau_3} \approx T_{II} \quad T_{I\bar{I}} \quad T_{II} \quad T_2, \quad (8)$$

где T_1 – большая постоянная времени; T_2 – меньшая (но соизмеримая с T_1) постоянная времени.

Применение данного метода не требует дополнительного исследования контура управления на устойчивость и обеспечивает получение стандартного переходного процесса:

$$x(\tau) = 1 - e^{\gamma} (\cos \gamma + \sin \gamma), \quad \text{где } \gamma = \frac{\tau/\tau_3}{\sqrt{2}}, \quad (9)$$

с количественными оценками качества переходного процесса:

$$\sigma = 4.3\%; \quad \tau_{p1} = 4.7\tau_3; \quad \tau_{p2} = 8.4\tau_3.$$

2. Порядок выполнения работы

1. Включить лабораторную установку, при включении загорается сигнальная лампа «Работа включена».

2. Переключить систему в автоматический режим управления с помощью УП-2 положение «Авт.».

3. Установить задатчик на 1/3 диапазона изменения выходной величины. Дождаться окончания переходного процесса. Зафиксировать в журнале наблюдения начальные значения регулируемого параметра Y_1 и положение вала ИМ.

4. Увеличить задание на 5–15% и тут же отключить вторичный прибор^{xv}. Фиксировать в журнале наблюдений каждые 3–5 с значения положения вала ИМ (для регулятора это выходная величина, а для ОУ – входная) до тех пор пока стрелка указателя не достигнет конца шкалы.

5. Включить вторичный прибор в работу и дождаться окончания переходного процесса. Зафиксировать в журнале наблюдения значение регулируемой величины Y_2 .

6. По экспериментальным данным построить траекторию изменения положения вала ИМ во времени (кривую разгона регулятора), примерный вид которой показан на рис. 1. По графику

^{xv} Тем самым вы размыкаете САУ, и на вход регулятора поступает постоянный по величине в 5–15% сигнал рассогласования

определить действительные значения параметров настройки ПИ-регулятора K^*_P и $T^*_{ИЗ}$.

7. Рассчитать параметры настройки ПИ-регулятора теоретическим способом, используя для расчета определенные в предыдущих работах параметры объекта $K_{ОБ}$, τ_3 , T_O и таблицу лаб. раб. №2 и формулу (9) лаб. раб. №3.

8. Сравнить расчётные и экспериментальные параметры настройки регулятора. Сделать выводы об оптимальности настройки регулятора и виде переходного процесса.

Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите типовые законы регулирования и напишите формулы этих законов.
2. В каких случаях целесообразно применять ПИД-регулятор и почему?
3. Перечислите методы определения оптимальных параметров настройки регуляторов. Чем отличаются/схожи эти методы?
4. Назовите преимущества использования ПИ-регулятора.
5. Почему настройки параметров регулятора называются «оптимальными», что это обозначает?
6. Каким образом можно получить кривую разгона регулятора?

Лабораторная работа №6

ИЗУЧЕНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ (12 СТЕНД)

Цель работы: изучить систему автоматического регулирования температуры в нагревательной печи по принципиальной электрической, функциональной, структурной схемам.

1. Описание лабораторной установки

Лабораторный стенд представляет реальный промышленный контур регулирования температуры в электрической нагревательной печи. Общий вид лицевой панели стенда представлен на рис. 1.

Температура нагревательного элемента измеряется термопарой ТХК (ТХА) и регистрируется электронным потенциометром КСП-3.

Сигнал отклонения действительного значения температуры нагревателя от заданного значения (сигнал рассогласования) формируется специальным механическим устройством 10%-го датчика, встроенным в КСП-3. В качестве регулятора температуры

используется регулирующий прибор РП25.1.2, реализующий ПИД-закон регулирования. Положение вала отображается на УП ИМ.

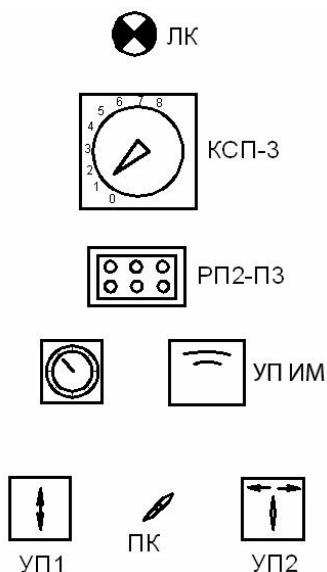


Рис. 1. Вид лицевой панели лабораторной установки

Принципиальная электрическая схема контура регулирования представлена на рис. 2. Управление исполнительным механизмом типа ИМ-2/120 осуществляется по бесконтактной схеме с использованием ПБР-2-3 (пускатель бесконтактный реверсивный однофазный). Выходной вал исполнительного механизма (ИМ) перемещает движок лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) и тем самым изменяет напряжение питания нагревательного элемента (нихромовой спирали), изменяя его температуру.

Переключение режимов управления ИМ «Авт.» (автоматический), «Руч.» (ручной) осуществляется переключателем УП-1. Управление движением ИМ в режиме ручного управления осуществляется с использованием кнопок «Б» и «М» с взаимной механической блокировкой.

Индикация положения выходного вала ИМ осуществляется дистанционным указателем положения УП ИМ, получающим сигнал с реостата обратной связи R_{oc} , установленным в исполнительном механизме ИМ-2/120. Включение установки осуществляется средним переключателем ПК.

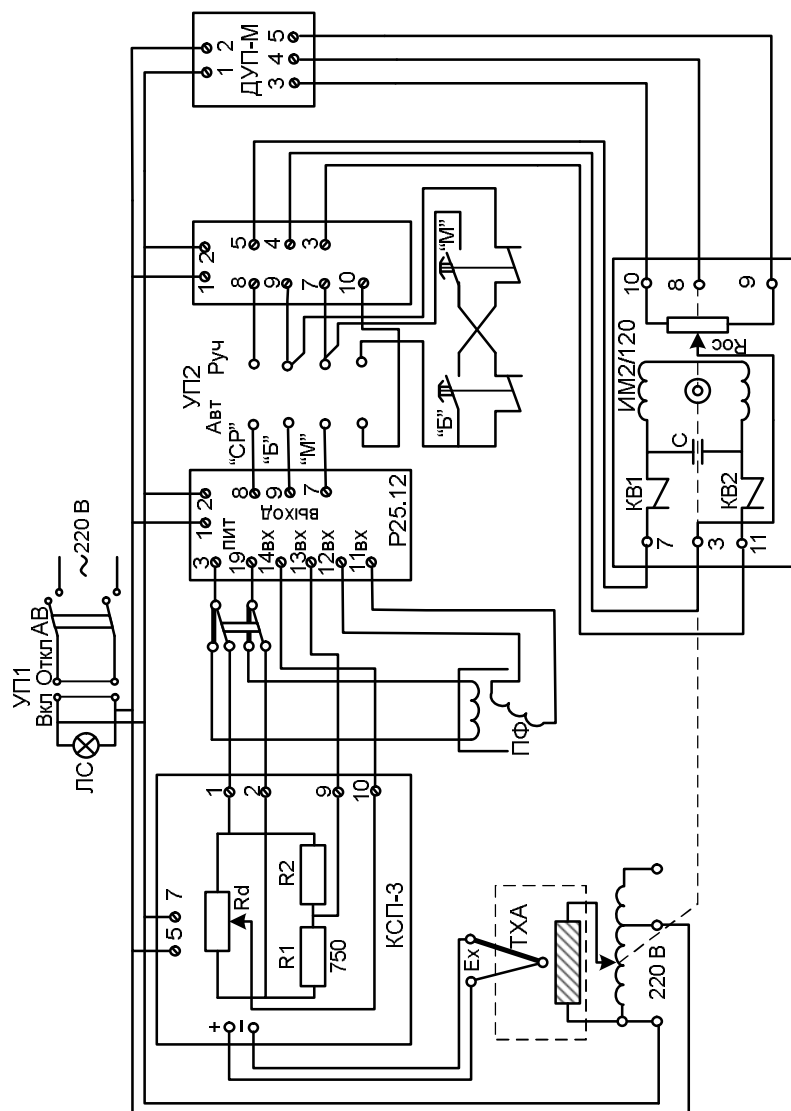


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема

Кинематика механизма задатчика, встроенного в КСП-3, такова что при равенстве действительного значения температуры заданному (сигнал рассогласования нулевой) движок реостатного датчика R_d находится в среднем положении, т.е. на середине реостата.

При отклонении температуры от задания в любую сторону на 5% от диапазона шкалы прибора движок реостата R_d перемещается в одно из крайних положений. Диапазон действия задатчика составляет 10% от шкалы прибора. Механизм задатчика позволяет выбрать этот 10%-й диапазон контроля на любом участке шкалы. И среднее положение движка, соответствующее середине выбранного 10%-го диапазона, будет определять заданное значение температуры.

Сигнал рассогласования формируется как разность потенциалов средней точки и положения движка реостата R_d , движок которого механически связан со стрелкой измерительного прибора. В остальном электрическая схема контура является типовой. Управляющие команды, формируемые регулятором, снимаются с выходных клем 7–8 и 9–8. Сигналы с регулятора через ПБР-2-3 управляют движением исполнительного механизма.

2. Функциональная схема автоматизации

Функциональная схема автоматизации контура регулирования температуры представлена на рис. 3.

В контуре регулирования температуры в качестве датчика используется термоэлектрический преобразователь (термопара) ТХА, поз. 1а. Далее сигнал поступает на показывающий и регистрирующий прибор типа КСП-3, поз. 1б, со встроенным задатчиком. Сигнал рассогласования между заданным и текущим значениями подается на регулирующий прибор типа Р25.1.2, поз. 1в. Регулирующий прибор в соответствии с заданным алгоритмом формирует управляющий сигнал. Сигнал от регулирующего прибора проходит через блок ручного управления, состоящий из универсального переключателя режимов управления «Руч.»–«Авт.» УП-1, поз. SA, и кнопок управления дистанционным режимом «Б»–«М», поз. SB. Затем сигнал поступает на бесконтактный реверсивный пускатель типа ПБР-2-3, поз. 1г, который усиливает выходной сигнал с регулирующего прибора, небольшой по величине. Регулирование осуществляется изменением напряжения питания нагревательного элемента. Выходной вал исполнительного механизма типа МЭО-2/120, поз. 1е, перемещает

движок реохорда, изменяя тем самым напряжение питания. Положение вала ИМ отображается на милливольтметре, поз. 1д.

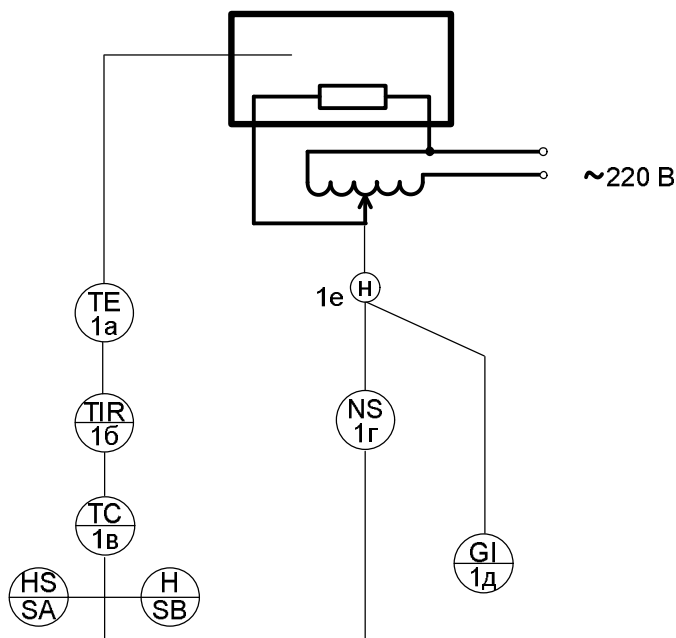


Рис. 3. Функциональная схема автоматизации

3. Порядок выполнения работы

1. Изучить лабораторный стенд.
2. Снять статическую характеристику объекта управления (см. лаб. раб. №1) и построить график. Определить коэффициент передачи объекта, построить график.
3. Снять кривую разгона (см. лаб. раб. №2) либо импульсную характеристику (см. лаб. раб. №3)^{XVI}, построить и рассчитать параметры объекта.
4. Снять переходный процесс в автоматическом режиме (см. лаб. раб. №4) при увеличении и уменьшении величины задания, а также на разных участках статической характеристики. Определить показатели качества работы САР.
5. Составить структурную схему САР, сделать выводы по работе.

^{XVI} По заданию преподавателя.

Вопросы для самоконтроля

1. По электрической принципиальной схеме объясните работу САР.
2. Можно ли одновременно подать на ИМ команды «больше» и «меньше»? Почему?
3. Какие контакты замыкает УП-2?
4. Составьте спецификацию оборудования к схеме автоматизации САР.
5. По функциональной схеме автоматизации объясните работу САР.

Лабораторная работа №7

ИЗУЧЕНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ В НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ (10 СТЕНД)

Цель работы: изучить систему автоматического регулирования температуры в нагревательной печи по принципиальной электрической, функциональной, структурной схемам.

1. Описание лабораторной установки

Большинство технологических процессов протекает в рабочем пространстве нагревательных печей. Давление в рабочем пространстве печи – это важный технологический параметр, определяющий скорость протекания процессов и обеспечивающий условия своевременного удаления нагреваемой среды из рабочего пространства агрегата.

Низкое давление (разрежение) приводит к подсосу холодного воздуха из атмосферы и охлаждению рабочего пространства, что ведет к непроизводительным затратам топлива и энергии.

Слишком высокое давление обуславливает значительные потери горячих продуктов горения через неплотности стенок, затворов печи, что приводит к преждевременному износу нагревательного агрегата, загрязнению атмосферы цеха и непроизводительным потерям тепла.

Величину давления в рабочем пространстве необходимо поддерживать на определенном заданном уровне, определяющем минимальные потери тепла и обеспечивающем оптимальные условия работы печи. Поддержание заданного значения давления осуществляется системой автоматического регулирования изучаемой в данной лабораторной работе.

На лабораторном стенде реально представлено рабочее пространство печи и условия удаления воздушных продуктов из рабочего пространства. Размещение оборудования на лицевой панели лабораторной установки представлены на рис. 1.

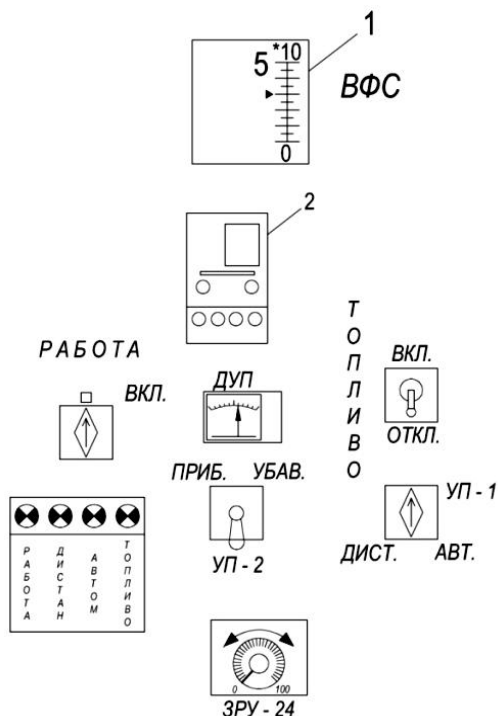


Рис. 1. Лицевая панель щита:
1 – вторичный прибор ВФС; 2 – регулятор РПИБ.

Включение установки в работу осуществляется с помощью переключателя «Раб.». Выбор способа управления исполнительным механизмом (режима САР) осуществляется с помощью универсального переключателя УП-1 «Авт.-Дист.». Изменение направления движения исполнительного механизма при ручном управлении осуществляется универсальным переключателем УП-2 «Убавить–Прибавить».

Принципиальные электрические схемы регулирования давления и бесконтактного управления исполнительным механизмом представлены соответственно на рис. 2, 3.

3. Порядок выполнения работы

1. Изучить лабораторный стенд.
2. Снять статическую характеристику ОУ (см. лаб. раб. №1), построить график. Определить коэффициент передачи объекта, построить график.
3. Снять кривую разгона (см. лаб. раб. №2) либо импульсную характеристику (см. лаб. раб. №3), построить и рассчитать параметры объекта.
4. Снять переходный процесс в автоматическом режиме при увеличении и при уменьшении задания (см. лаб. раб. №4). Определить показатели качества работы САР.
5. Произвести градуировку задатчика. Построить градуировочную зависимость: по оси абсцисс – задание, %, по оси ординат – среднее значение установившегося давления, Па.
6. Составить структурную схему САР, сделать выводы по работе.

Вопросы для самоконтроля

1. По электрической принципиальной схеме объясните работу САР.
2. Каково соотношение инерционностей ОУ и измерительного канала? Чем это объясняется?
3. Какие контакты замыкает УП-1, зачем он используется в САР?
4. Составьте спецификацию оборудования к схеме автоматизации САР.
5. По функциональной схеме автоматизации объясните работу САР.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теория автоматического управления / В.Н. Брюханов, М.Г. Косов, С.П. Протопов и др.; под ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Высшая школа, 2000. – 268 с.
2. Теория автоматического управления: учебник / С.Е. Думин, Н.С. Зотов и др.; под ред. В.Б. Яковлева. – М.: Высшая школа, 2003. – 567 с.
3. Информационные системы в металлургии: учебник для вузов / Н.А. Спирин, Ю.В. Игнатов и др. – Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2001. – 617 с.
4. Плетнев Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике: учебник для вузов. 3-е изд. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 352 с.

5. Благовещенская М.М. Автоматика и автоматизация процессов пищевых производств. – М.: Агропромиздат, 1991. – 230 с.
6. Соколов В.А. Автоматизация технологических процессов в пищевой промышленности: учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1991. – 445 с.
7. Автоматизация технологических процессов. Условные обозначение приборов и средств автоматизации в схемах. ГОСТ 21.404-85.
8. Парсункин Б.Н., Дубинин В.М., Рябчиков М.Ю. Определение динамических параметров объекта управления по экспериментальным характеристикам: учеб. пособие /. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. – 91 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Лабораторная работа №1. Изучение статических свойств объекта управления.....	4
Лабораторная работа №2. Исследование динамических параметров объекта управления по кривой разгона	11
Лабораторная работа №3. Изучение динамических свойств объекта управления и определение его параметров по импульсной характеристике.....	22
Лабораторная работа №4. Определение показателей качества системы автоматического управления технологическим параметром	30
Лабораторная работа №5. Изучение типовых законов регулирования и расчет оптимальных параметров настроек регулятора САУ.....	36
Лабораторная работа №6. Изучение системы автоматического регулирования температуры в нагревательной печи (12 стенд)	45
Лабораторная работа №7. Изучение системы автоматического регулирования давления в нагревательной печи (10 стенд).....	50
Библиографический список	55

Учебное издание

ОБУХОВА Татьяна Геннадьевна
САМАРИНА Ирина Геннадьевна

**Исследование промышленных систем
автоматического управления
технологическими параметрами**

Практикум

Редактор Н.П. Боярова
Компьютерная верстка Л.М. Недеялковой

Подписано в печать 25.09.2012. Рег. № 36-12. Формат 60х84/16. Бумага тип. № 1.
Плоская печать. Усл.печ.л. 3,75. Тираж 100 экз. Заказ 601



Издательский центр ФГБОУ ВПО «МГТУ»
455000, Магнитогорск, пр. Ленина, 38
Полиграфический участок ФГБОУ ВПО «МГТУ»

Т.Г. Обухова
И.Г. Самарина

**Исследование
промышленных систем
автоматического управления
технологическими параметрами**

г. Магнитогорск 2012