

№ 2179

В.Ф. Бердышев
К.С. Шатохин

Основы автоматизации технологических процессов очистки газов и воды

Курс лекций

№ 2179

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Кафедра теплофизики и экологии металлургического производства

В.Ф. Бердышев

К.С. Шатохин

Основы автоматизации технологических процессов очистки газов и воды

Курс лекций

Рекомендовано редакционно-издательским
советом университета



Москва 2013

УДК 669.2/.8:669.015.7

Б48

Рецензент

канд. техн. наук, доц. *С.В. Коминов*

Бердышев, В.Ф.

Б48 Основы автоматизации технологических процессов очистки газов и воды : курс лекций / В.Ф. Бердышев, К.С. Шатохин. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2013. – 136 с.
ISBN 978-5-87623-673-9

В учебном курсе рассмотрены методы анализа и синтеза систем автоматического контроля и управления на основе изучения теории автоматического управления. Уделено внимание конструкциям, принципу действия и выбору элементов систем автоматики, анализу устойчивости переходных процессов и качества регулирования, основам автоматизированного проектирования.

Предназначен для студентов специальности 280202 «Инженерная защита окружающей среды (в металлургии)».

УДК 669.2/.8:669.015.7

ISBN 978-5-87623-673-9

© Бердышев В.Ф,
Шатохин К.С., 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1. Основы теории автоматического управления.....	7
1.1. Статические характеристики элементов и систем управления.....	7
1.2. Дифференциальные уравнения и передаточные функции.....	8
1.3. Реакция элементов и систем на возмущающие воздействия.....	9
1.4. Типовые динамические звенья.....	13
1.5. Передаточные функции САР.....	21
1.6. Устойчивость САР.....	27
1.7. Качество переходного процесса в САР.....	33
2. Теплотехнические измерения и приборы.....	36
2.1. Классификация элементов систем автоматики.....	36
2.2. Понятие о температуре и температурных шкалах.....	38
2.3. Пирометры излучения.....	39
2.4. Контактные средства измерения температуры.....	43
2.5. Приборы для контактных средств измерения температуры.....	47
2.6. Общие сведения об измерении давления.....	50
2.7. Жидкостные и деформационные приборы для измерения давления.....	52
2.8. Методы динамического напора и переменного перепада давления для измерения расхода.....	56
2.9. Расходомеры специального назначения.....	62
3. Контроль процессов очистки промышленных выбросов.....	65
3.1. Методы измерения концентрации пыли, основанные на ее осаждении.....	65
3.2. Методы измерения концентрации пыли без ее предварительного осаждения.....	67
3.3. Методы и приборы определения дисперсного состава пыли.....	72
3.4. Измерение состава газовых смесей.....	77
3.5. Измерение концентрации растворов.....	80
4. Элементы систем автоматики.....	83
4.1. Нормирующие преобразователи.....	83
4.2. Аналого-цифровые преобразователи.....	84
4.3. Логические элементы.....	86
4.4. Типовые законы регулирования.....	87
4.5. Принципы их формирования законов регулирования.....	92

4.6. Микропроцессорные средства автоматического регулирования	94
4.7. Исполнительные механизмы и регулирующие органы.....	95
4.8. Синтез систем автоматического регулирования	98
5. Автоматизация технологических процессов	
очистки газов и воды.....	101
5.1. Схемы автоматизации	101
5.2. Изображение приборов и средств автоматизации	102
5.3. Графическое оформление схем автоматизации	108
5.4. Типовые узлы САР газоочистных установок	111
5.5. Автоматизация процесса очистки газа в электрофильтре	115
5.6. Автоматизация процесса очистки газа в тканевых фильтрах	120
5.7. Автоматизация процесса очистки газа в мокрых газоочистных установках	123
5.8. Автоматизация процессов очистки промышленных сточных вод, загрязненных кислотами и ионами тяжелых металлов.....	125
5.9. Автоматизация обезвреживания хромсодержащих стоков	130
5.10. Спецификации на оборудование систем автоматизации. Монтаж и пусконаладочные работы	133
Библиографический список	135

ВВЕДЕНИЕ

Автомат – самостоятельно действующее устройство, выполняющее по заданной программе без непосредственного участия человека получение, преобразование, передачу и использование энергии, материала и информации. *Автоматизация* – процесс в развитии производства, при котором функции человека передаются приборам и автоматическим устройствам.

В зависимости от степени участия человека в технологическом процессе различают следующие основные разновидности автоматизации:

- контроль – наблюдение, обеспечивающее необходимые условия для получения и обработки информации о текущем состоянии технологического процесса;
- регулирование – воздействие на процесс, когда заданные параметры поддерживаются автоматическими устройствами;
- управление – выработка и осуществление заданных последовательностей технологических операций и воздействий.

Виды регулирования: поддержание постоянства (стабилизация) некоторой величины, характеризующей технологический процесс, либо ее изменение по заданному закону (программное регулирование) или в соответствии с некоторым измеряемым внешним процессом (следящее регулирование). *Объект регулирования* – определенный агрегат или группу установок, связанных общим технологическим процессом. Для осуществления регулирования к объекту подключается комплекс устройств, представляющий собой в совокупности *регулятор*. Объект и регулятор образуют *систему автоматического регулирования* (САР).

Под *объектом управления* понимают части технологического процесса или агрегата, целиком технологические процессы, агрегаты, цехи, производственные предприятия и т.д. Целью управления технологическими процессами и агрегатами является получение оптимального значения величины или некоторого обобщающего комплекса величин, например: максимальная производительность агрегата, минимальная стоимость продукта, минимальное время перехода объекта из одного состояния в другое. Совокупность объекта управления и технических устройств, обеспечивающих управление этим объектом, называют *системой автоматического управления* (САУ).

В процессе развития промышленных систем управления под влиянием возрастания объемов информации, появления быстротекущих технологических процессов и других обстоятельств возникла проблема автоматизации собственно процесса управления – процесса принятия решений. Появились *автоматизированные системы управления* (АСУ) – человеко-машинные системы, реализующие процесс сбора и переработки информации, необходимой для принятия решений по управлению объектом в целом. В них часть функций выполняется автоматически, а часть – человеком. При этом роль человека остается существенной, так как ряд задач принятия решений в силу их сложности неизученности не поддается формализации (математическому описанию) и их выполнение не может быть полностью автоматизировано.

Кроме систем контроля, регулирования и управления существуют и другие системы автоматизации: в качестве резерва при отключении автомата или для осуществления частичной автоматизации предусматривают узлы дистанционного управления, технологической сигнализации и аварийной защиты.

Начало работ по автоматизации процессов черной металлургии в нашей стране относится к концу 30-х годов XX в., когда были разработаны и внедрены системы регулирования теплового режима мартеновских печей. В 1950-е годы были созданы системы регулирования доменных, нагревательных и термических печей, прокатных станов, различных энергетических установок. Существенные результаты были получены в области автоматизации процессов электроплавки.

Со второй половины 1960-х годов в связи с появлением достаточно дешевых быстродействующих и надежных вычислительных машин в черной металлургии всего мира началась эра АСУ. Это стало особенно актуальным, когда были созданы высокопроизводительные агрегаты большой единичной мощности, существенно возросли требования к качеству продукции и экономичности производства.

1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

1.1. Статические характеристики элементов и систем управления

Статической характеристикой системы или ее элемента называется зависимость выходной величины от входной величины (возмущающего воздействия) в установившемся состоянии:

$$x_{\text{ВЫХ}} = f(x_{\text{ВХ}}).$$

Примеры статических характеристик: зависимость э.д.с. термоэлектрического термометра от температуры среды, зависимость температуры печи от расхода топлива.

Если статическую характеристику можно представить линейной функцией

$$x_{\text{ВЫХ}} = a + kx_{\text{ВХ}},$$

то характеристику и звено называют *линейными* (рис. 1.1, а); в противном случае – *нелинейными*. Некоторые виды нелинейных характеристик могут быть *линеаризованы*, т.е. с определенными допущениями заменены линейными зависимостями (рис. 1.1, б). Коэффициент пропорциональности $k = \operatorname{tg} \alpha$ в последнем выражении называют *коэффициентом передачи (усиления)*.

Некоторые статические характеристики не поддаются линеаризации и их называют существенно нелинейными (например, статические характеристики релейных элементов – рис. 1.1, в). Кроме того, встречаются статические характеристики с минимумом и максимумом в пределах возможных изменений $x_{\text{ВХ}}$ и $x_{\text{ВЫХ}}$ – экстремальные характеристики (рис. 1.1, г).

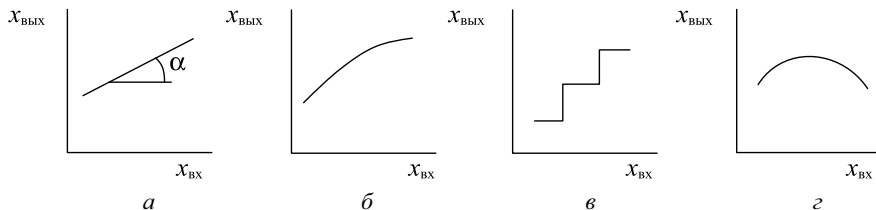


Рис. 1.1. Виды статических характеристик

Линейными называют системы с линейными статическими характеристиками или со статическими характеристиками, поддающимися линеаризации.

1.2. Дифференциальные уравнения и передаточные функции

Динамические свойства линейных систем и их элементов однозначно характеризуются линейными дифференциальными уравнениями (ДУ) с постоянными коэффициентами:

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n x_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_2 \frac{d^2 x_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dx_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt} + a_0 x_{\text{ВЫХ}}(t) = \\ = b_m \frac{d^m x_{\text{ВХ}}(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x_{\text{ВХ}}(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_2 \frac{d^2 x_{\text{ВХ}}(t)}{dt^2} + b_1 \frac{dx_{\text{ВХ}}(t)}{dt} + b_0 x_{\text{ВХ}}(t). \end{aligned}$$

При записи ДУ принято выходную величину и ее производные располагать в левой части уравнения, а входную величину и ее производные – в правой части.

ДУ простых элементов можно составить, используя закономерности протекающих в них физических явлений. Такими законами могут быть, например, закон сохранения вещества (для объектов регулирования давления, уровня), закон сохранения энергии (для объектов регулирования температуры) и другие основные законы физики.

Как известно, решение линейного неоднородного ДУ находят как сумму общего решения соответствующего однородного уравнения (с обнуленной правой частью) и частного решения неоднородного. В результате получается уравнение *переходного процесса* $x_{\text{ВЫХ}}(t)$, описывающего изменение выходной величины во времени после нанесения возмущающего воздействия $x_{\text{ВХ}}(t)$.

ДУ можно решать и другим методом – с использованием интегральных преобразований Лапласа, которые заключаются в переходе от оригинала функции $x(t)$ к ее изображению $L[x(t)] = x(p)$, определяемому соотношением

$$L[x(t)] = x(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} \cdot x(t) dt,$$

где p – некоторое комплексное число.

Существуют таблицы преобразований по Лапласу для многих часто встречающихся функций. Например, $L[A] = A/p$, $L[Ae^{-at}] =$

$= A / (p + \alpha)$ и т.д. Изображение производной какой-либо функции при нулевых начальных условиях равно изображению этой функции, умноженному на p^n , где n – порядок дифференцирования. Изображение интеграла какой-либо функции равно изображению этой функции, деленному на p^m , где m – порядок интегрирования. Преобразование Лапласа является линейным, т.е. обладает следующими свойствами: 1) изображение суммы функций равно сумме их изображений, 2) константа выносится за знак изображения.

Таким образом, вместо ДУ при переходе к изображениям по Лапласу получаются алгебраические выражения – это и используют при решении ДУ.

Преобразовав по Лапласу левую и правую части исходного ДУ при нулевых начальных условиях и вынеся за скобки изображения выходной и входной величин, получим операторную форму записи ДУ:

$$(a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_2 p^2 + a_1 p + a_0) x_{\text{ВЫХ}}(p) = (b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_2 p^2 + b_1 p + b_0) x_{\text{ВХ}}(p).$$

Далее, при заданном изменении входной величины $x_{\text{ВХ}}(t)$, находим ее изображение по Лапласу $x_{\text{ВХ}}(p)$, подставляем в последнее выражение и решаем относительно $x_{\text{ВЫХ}}(p)$. После этого по таблицам преобразований Лапласа совершаем обратное преобразование от изображения функции $x(p)$ к ее оригиналу $x(t)$ и находим решение ДУ: $x_{\text{ВЫХ}}(t) = L^{-1} [x_{\text{ВЫХ}}(p)]$.

Из операторной формы записи ДУ получается выражение

$$W(p) = \frac{x_{\text{ВЫХ}}(p)}{x_{\text{ВХ}}(p)} = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_2 p^2 + a_1 p + a_0},$$

которое называется *передаточной функцией* и является отношением изображений по Лапласу выходной и входной величин.

Передаточная функция, так же как и ДУ, однозначно характеризует динамические свойства элементов и систем автоматического управления.

1.3. Реакция элементов и систем на возмущающие воздействия

Динамической характеристикой системы или ее элемента называется зависимость выходной величины от времени при переходе из одного установившегося состояния в другое при любом изменении входной величины (возмущающего воздействия):

$$x_{\text{ВЫХ}} = f(t).$$

При исследовании переходных процессов удобнее рассматривать несколько *типовых возмущающих воздействий*: ступенчатую функцию, импульсную функцию, гармонические колебания. Реакцию системы на типовые воздействия можно найти как теоретически, если известно ДУ, так и экспериментально.

Переходной функцией $h(t)$ называется изменением выходной величины во времени после единичного ступенчатого изменения входной величины $x_{\text{ВХ}}(t)$ (рис. 1.2).

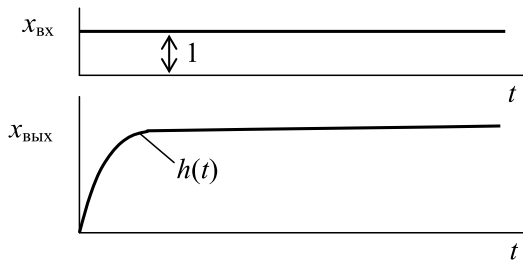


Рис. 1.2. Переходная функция

Если ступенчатое возмущающее воздействие отличается от единичного, то реакцию системы на такое воздействие называют *кривой разгона*.

Под единичной импульсной функцией понимается импульс, площадь которого равна единице. При времени импульса $t \rightarrow 0$ эта функция превращается в математическую идеализацию, называемую *дельта-функцией*, значение которой равно нулю при всех значениях времени, кроме $t = 0$, когда оно равно бесконечности.

Реакция системы на входное воздействие в виде дельта-функции при нулевых начальных условиях называется *импульсной переходной функцией* (*функцией веса*).

Переходную функцию и функцию веса называют *временными динамическими характеристиками*.

Если на вход линейной системы поступают гармонические колебания, например синусоидальные,

$$x_{\text{ВХ}}(t) = A_{\text{ВХ}} \sin(\omega t),$$

то на выходе после некоторого переходного процесса также установятся гармонические колебания той же частоты ω , но с другой ам-

плитудой $A_{\text{ВЫХ}}$ и сдвинутые по фазе относительно входных колебаний на угол φ :

$$x_{\text{ВЫХ}}(t) = A_{\text{ВЫХ}} \sin(\omega t - \varphi).$$

Здесь ω – угловая частота, рад/с, $\omega = 2\pi\nu = 2\pi/T$, T – период колебаний.

Если $A_{\text{ВХ}} = 1$, то входное воздействие называют *единичным гармоническим* (рис. 1.3).

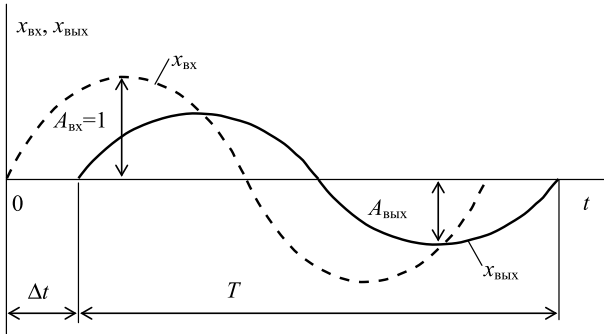


Рис. 1.3. Реакция системы на единичное гармоническое воздействие

При изменении частоты входных колебаний каждой частоте будет соответствовать своя амплитуда выходных колебаний и сдвиг по фазе. Угол $\varphi(\omega)$ рассчитывают по временному сдвигу Δt :

$$\varphi(\omega) = \Delta t \omega = \frac{2\pi \Delta t}{T}.$$

Зависимость отношения амплитуды выходных колебаний к амплитуде входных колебаний от частоты

$$A(\omega) = \frac{A_{\text{ВЫХ}}(\omega)}{A_{\text{ВХ}}(\omega)}$$

при изменении частоты от 0 до ∞ называется *амплитудно-частотной характеристикой* (АЧХ).

Зависимость сдвига по фазе от частоты $\varphi(\omega)$ при изменении частоты от 0 до ∞ называется *фазочастотной характеристикой* (ФЧХ).

Для исследований и расчетов систем автоматизации применяют преобразование Фурье, которое состоит в переходе от оригинала

функции $x(t)$ к ее изображению $F[x(t)] = x(j\omega)$ и определяется соотношением

$$F[x(t)] = x(j\omega) = \int_0^{\infty} e^{-j\omega t} \cdot x(t) dt,$$

где j – мнимая единица (число, квадрат которого равен -1).

Сравнивая выражения для преобразований Лапласа и Фурье, можно сделать вывод, что для перехода от изображения функции по Лапласу к ее изображению по Фурье необходимо произвести замену символа p независимой комплексной переменной символом $j\omega$ мнимого числа.

Существует тесная взаимосвязь между преобразованиями Лапласа и Фурье. Аналогично передаточной функции $W(p)$ существует функция,

$W(j\omega) = \frac{x_{\text{вых}}(j\omega)}{x_{\text{вх}}(j\omega)}$, равная отношению изображений по Фурье

выходной и входной величин и называемая *амплитудно-фазовой характеристикой* (АФХ) линейной системы или элемента.

Выделяя действительную $\text{Re}(\omega)$ и мнимую $\text{Im}(\omega)$ составляющие, можно представить АФХ в алгебраической форме:

$$W(j\omega) = \text{Re}(\omega) + j\text{Im}(\omega).$$

АФХ можно также представить в виде радиуса-вектора на комплексной плоскости и записать в показательной форме:

$$W(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)},$$

где $A(\omega)$ – модуль вектора $W(j\omega)$ (представляет собой АЧХ); $\varphi(\omega)$ – аргумент вектора $W(j\omega)$ (представляет собой ФЧХ).

При строгом подходе АФХ строится на комплексной плоскости при изменении частоты от $-\infty$ до $+\infty$, однако, поскольку АФХ симметрична относительно действительной оси при изменении частоты от $-\infty$ до 0 и от 0 до $+\infty$, достаточно построить АФХ только для изменения частоты от 0 до $+\infty$ (рис. 1.4). Конец вектора $W(j\omega)$ описывает на комплексной плоскости кривую, которая называется годографом АФХ.

Переход от алгебраической формы записи АФХ к показательной осуществляется по следующим соотношениям: