А.М. Инков

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ. ЛЕКЦИЯ № 8



Шымкент, 2011

Тема 5 Методы идентификации на основе простейших тестирующих сигналов

Лекция 8 Определение переходных характеристик

В лекции рассмотрены методы идентификации объектов управления на основе простейших тестирующих сигналов. Эти методы традиционно применяются в инженерной практике. Рассмотрено определение переходных характеристик при нанесении на вход объекта возмущений регулярной формы и методы. аппроксимация временных характеристик.

Методы идентификации с помощью синусоидальных, ступенчатых и импульсных сигналов

Первые реализованные в системах управления методы идентификации были основаны на использовании частотных, ступенчатых и импульсных воздействий. Большинство этих методов ограничивается применением для линейных процессов. Они могут быть также использованы и в линеаризованных системах, если уровни сигналов невелики (см. приложение 1). Эти методы требуют специальных входных сигналов, а именно ступенчатых сигналов для идентификации по переходной функции (ступенчатой переходной функции), импульсных входных сигналов для идентификации по импульсной переходной функции и синусоидальных входных сигналов с различными частотами для определения частотной характеристики. Поскольку вместо входных сигналов, соответствующих нормальному режиму работы, требуются указанные выше специальные сигналы, то очевидно, что эти методы предполагают идентификацию вне процесса управления. Поэтому указанные методы применимы только к линейным стационарным процессам, где отношения вход/выход, полученные для одного типа входных сигналов, сохраняются для всех других типов входных сигналов.

Из трех типов входных сигналов, о которых говорилось выше, ступенчатый входной сигнал является наиболее простым для применения (он соответствует, например, открыванию или закрыванию входного клапана либо включению или выключению входного напряжения), тогда как для подачи синусоидального входного сигнала требуется формирование синусоидальных воздействий и изменение частоты в соответствующем диапазоне. При идентификации по импульсному воздействию часто возникают технические трудности, связанные с формированием и использованием импульсных входных сигналов. Этот метод нельзя применить к линеаризованным системам, так как амплитуда импульса по определению не может быть малой.

Здесь нами рассматривается проблема идентификации математической модели динамики объекта. При использовании методов идентификации на основе простейших тестирующих сигналов на вход исследуемого объекта подается некоторое возмущающее воздействие определенного вида. После этого регистрируется отклик системы на этот сигнал как функция времени. Далее производится математическая обработка выходного сигнала. Суть такой обработки состоит в следующем. Допустим, что исследуемый объект описывается некоторой неизвестной математической моделью. Тогда можно считать, что полученный график переходного процесса представляет решение дифференциального уравнения описывающей объект при известных начальных условиях и при известной математической модели входного сигнала. Это так называемая **обратная** задача, по определению она относится к классу **некорректно** поставленных задач, т.к. имеет бесконечное множество решений. Такие задачи требуют регуляризации, например выбора определенной структуры и вида искомой математической модели исходя из некоторой априорной информации об объекте. На практике часто предполагают, что достаточно точно свойства объекта описываются обыкновенными **линейными** дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами вида (2.3):

$$a_{n+1}\frac{d^n x}{dt^n}+\ldots+a_2\frac{dx}{dt}+a_1 x=b_{m+1}\frac{d^m u}{dt^m}+\ldots+b_2\frac{du}{dt}+b_1 u\,.$$

или считают, что адекватной математической моделью объекта может служить передаточная функция вида (2.8) или её разностный эквивалент вида (2.25):

$$W(p)=\frac{C}{1+T\cdot p}\cdot\exp(-p\cdot\tau) \qquad (*)$$

или более сложного вида (2.4) (если объект обладает самовыравниванием) или вида (2.9 – 2.11) для объекта без самовыравнивания.

Отметим что, несмотря на простоту выражения (*) оно достаточно точно описывает динамику широкого класса объектов в условиях малых отклонений. Существуют алгоритмы адаптации, которые осуществляют адаптивную т корректировку коэффициентов модели вида (*) или чаще (2.25) в условиях эксплуатации системы управления.

Для линейной системы справедлив принцип суперпозиции, заключающийся в том, что сумме любых возмущений соответствует сумма выходных реакций, каждая из которых определяется соответствующим воздействием; при любом изменении входного возмущения без изменения его формы выходная величина претерпевает такое же изменение, также не изменяя формы.

Принцип суперпозиции дает возможность выразить реакцию системы на любое возмущение через ее реакцию на определенный вид элементарных возмущений. Для этого достаточно представить произвольное возмущение элементарными воздействиями выбранного типа. В качестве типовых возмущений чаще всего применяют единичную скачкообразную функцию, единичную импульсную функцию, единичную линейную функцию, единичное гармоническое колебание, случайный двоичный сигнал и др..

1 Единичная скачкообразная функция описывает мгновенное изменение какого-то воздействия от 0 до 1 (рисунок .8.1).

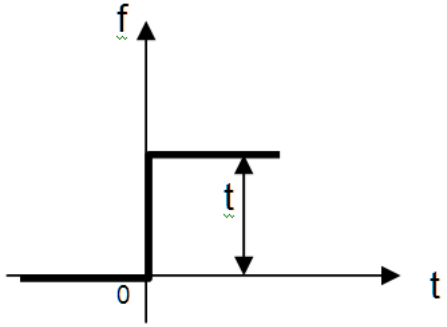


Рисунок .8.1 - . Единичная скачкообразная функция

Аналитически скачкообразную функцию записывают как :

$$f(t)=1(t)=\begin{cases} =0 \quad \text{при } t=-0 \text{ и } t<0 \\ \\ =1 \quad \text{при } t=+0 \text{ и } t>0 \end{cases} \qquad (8.1)$$

Т.е. это ступенчатое единичное воздействие вида:

$$f(t)=1(t)=\begin{cases} 1, t \geq 0 \\ 0, t \leq 0 \end{cases}$$

2 Единичная импульсная функция описывает кратковременное возмущение, имеющее характер кратковременного импульсного толчка (рисунок .8.2).

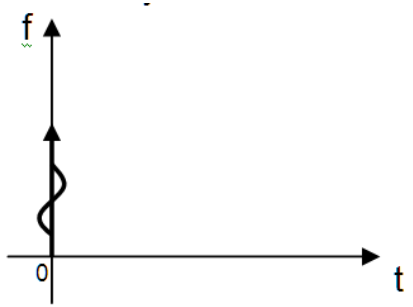


Рисунок .8.2 - . Единичная импульсная функция

Единичная импульсная функция, называемая δ - функцией Дирака (дельта - функцией), представляет собой первую производную от единичной скачкообразной функции:

$$\delta(t) = 1'(t) = \frac{d1(t)}{dt} \qquad (8.2)$$

и равна нулю везде, кроме $t = 0$, где она принимает бесконечное значение, причем при условии, что интеграл от нее по любому интервалу, содержащему $t = 0$, равен единице.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t)dt = 1 \qquad (8.3)$$

Т.е. $\delta(t) = \begin{cases} \delta(t) = \infty, t = t_0 \\ \delta(t) = 0, t \neq t_0 \end{cases}$.

Функцию, обладающую такими свойствами, можно получить как предел положительного прямоугольного импульса, имеющего единичную площадь, когда длительность этого импульса стремится к нулю (рисунок .8.3).

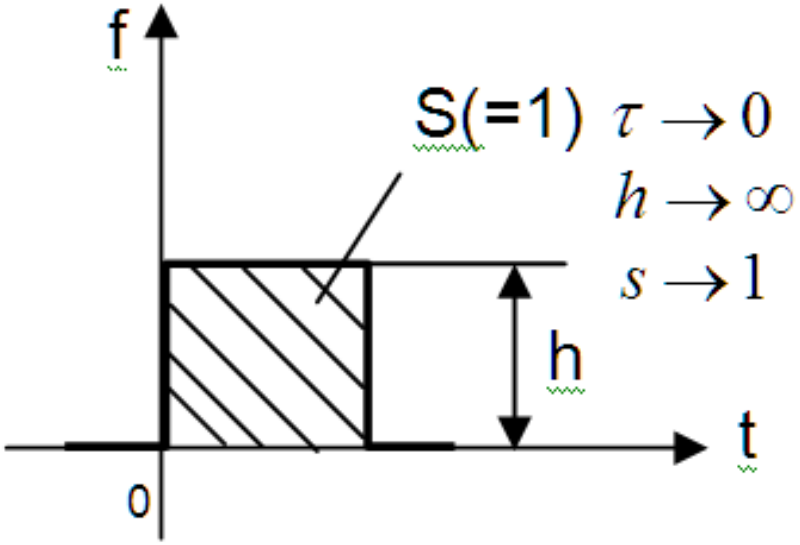


Рисунок .8.3 – К понятию единичная скачкообразная функция

3 Единичную линейную функцию $f(t) = kt$ при $k = 1$ называют еще рамповым возмущением (рисунок .8.4).

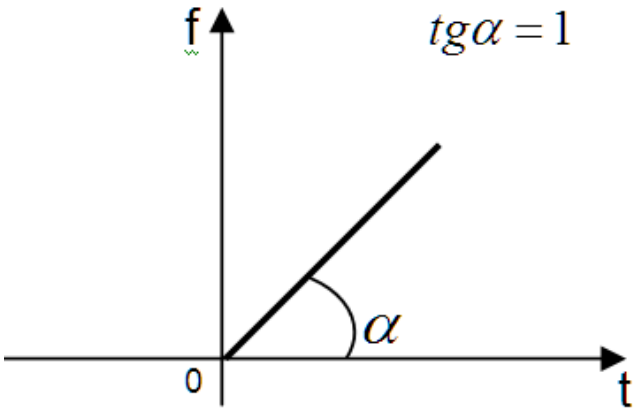


Рисунок .8.4 - . Единичная линейная функция

Такое возмущение является типичным для следящих систем регулирования.

4 Единичное гармоническое возмущение чаще всего записывают как функцию, изменяющуюся по синусоидальному закону (рисунок .8.5)

$$f(t) = \sin \omega t = e^{j\omega t} \qquad (8.5)$$

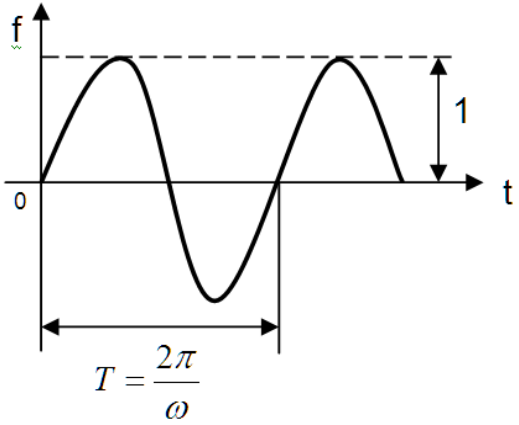


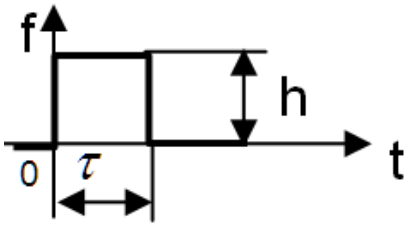
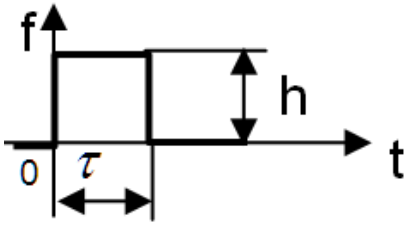
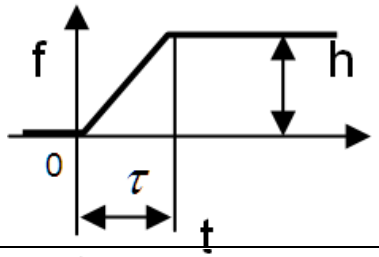
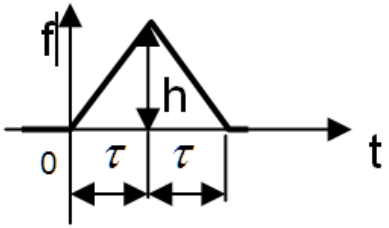
Рисунок .8.5 - Единичное гармоническое возмущение

Такой тип возмущений применяют при частотных методах анализа АСР.

В качестве возмущающих воздействий могут быть использованы и типовые функции, некоторые из которых приведены в таблице 8.1.

Таблица 8.1.

Типовые возмущающие воздействия

№п/п	Возмущение f(t)	График f(t)	Изображение F(p)
1	Ступенчатое при высоте ступени h		$\frac{h}{p}$ (8.6)
2	П-образное при высоте h и при длительности τ		$\frac{h}{p}(1-e^{-\tau p})$ (8.7)
3	Ступенчатое при высоте h и времени нанесения возмущения τ		$\frac{h}{\tau p^2}(1-e^{-\tau p})$ (8.8)
4	Треугольное при высоте h и времени нанесения возмущения 2τ		$\frac{h}{\tau p^2}(1-e^{-2\tau p})^2$ (8.9)

Простейшим входным сигналом, используемым при идентификации, является ступенчатый сигнал. Такой сигнал на входе системы может быть сформирован, например, путем внезапного открывания (или закрывания) входного клапана, включения (или выключения) управляющего напряжения или тока и т. д., так как это почти всегда возможно без применения специальной аппаратуры. У идеального ступенчатого сигнала время нарастания сигнала равно нулю, что физически невозможно, так как при этом скорость нарастания должна быть бесконечно большой. Следовательно, любой реальный ступенчатый входной сигнал является лишь аппроксимацией идеального ступенчатого сигнала. Однако если время нарастания сигнала гораздо меньше пе риода высшей гармоники, то ошибка идентификации становится незначительной. В процессах с помехами или в случаях, когда измерения содержат шум (что обычно имеет место на практике в той или иной степени), необходима соответствующая фильтрация шума.

Идентификация с помощью переходной функции проводится автономно, вне процесса управления, и поэтому применима только к стационарным процессам. Однако поскольку ступенчатые возмущения воздействуют на многие (если не на большинство) системы во время включения или в процессе нормальной работы, то переходные функцщ 'можно записать, не нарушая нормального режима работы системы. В этом заключается дополнительное преимущество рассматриваемого метода. Очевидно, при этом необходимо предположить, что система стационарная, так как результаты идентификации считаются достоверными и после приложения ступенчатого сигнала. Кроме того, предполагается, что в диапазоне амплитуд ступенчатого сигнала система линейна.

Для получения временной динамической характеристики объекта регулирования организуют специальный эксперимент.

В какой-то момент времени к объекту регулирования, находящемуся в установившемся режиме работы, прикладывают некоторое возмущающее воздействие и затем регистрируют отклонения регулируемой величины во времени до ее восстановившегося значения с помощью соответствующего измерительного прибора.

Перед началом эксперимента нужно убедиться в том, что объект регулирования находится в установившемся режиме работы. Для достоверности измеренных отклонений регулируемой величины необходимо один и тот же опыт повторять 2-3 раза.

В найденную путем эксперимента динамическую характеристику объекта включены характеристика собственно объекта и характеристика регистрирующего прибора.

В связи с этим желательно в качестве датчиков отклонений физических величин от их номинальных значений применять те, которые входят в измерительный блок регулирующего устройства, поддерживающего на каком-то значении данную физическую величину.

Для определения динамических свойств объекта на практике чаще всего используют методику снятия переходной характеристики. При определении динамических характеристик объекта по его переходной характеристике (кривой разгона) на вход подается или ступенчатый пробный сигнал или прямоугольный импульс – см.раздел 2.3. Во втором случае переходная характеристика (кривая отклика) должна быть достроена до соответствующей кривой разгона. Процесс получения передаточной функции объекта, исходя из данных о переходном процессе, называется идентификацией объекта.

При снятии переходной характеристики необходимо выполнить ряд условий, представленных в таблице 8.2:

Таблица8.2
Условия снятия переходной характеристики

No	Условия
1	Если проектируется система стабилизации технологического параметра, то переходная характеристика должна сниматься в окрестности рабочей точки процесса.
2	Переходные характеристики необходимо снимать как при положительных, так и отрицательных скачках управляющего сигнала. По виду кривых можно судить о степени асимметрии объекта. При небольшой асимметрии расчет настроек регулятора рекомендуется вести по усредненным значениям параметров передаточных функций. Линейная асимметрия наиболее часто проявляется в тепловых объектах управления.
3	При наличии зашумленного выхода желательно снимать несколько переходных характеристик (кривых разгона) с их последующим наложением друг на друга и получением усредненной кривой.
4	При снятии переходной характеристики необходимо выбирать наиболее стабильные режимы процесса, например, ночные смены, когда действие внешних случайных возмущений маловероятно.
5	При снятии переходной характеристики амплитуда пробного входного сигнала должна быть, с одной стороны, достаточно большой, чтобы четко выделялась переходная характеристика на фоне шумов, а, с другой стороны, она должна быть достаточно малой, чтобы не нарушать нормального хода технологического процесса.

Примечание к таблице 8.2: Начальные условия снятия переходной характеристики. В начальный момент необходимо, чтобы система управления находилась в покое, т.е. регулируемая величина **X** (например, температура в печи) и управляющее воздействие регулятора **Y** (выход регулятора на исполнительный механизм) не изменялись, а внешние возмущения отсутствовали. Например, температура в печи оставалась постоянной и исполнительный механизм не изменяет своего положения. Затем на вход исполнительного механизма подается ступенчатое воздействие, например, включается нагреватель. В результате состояние объекта начинает изменяться.

Определение динамических характеристик объекта управления с самовыравниванием по его переходной характеристике. Наиболее часто при определении динамических свойств объекта регулирования применяют ступенчатое возмущающее воздействие, т.е. экспериментально находят переходную функцию объекта (рисунок .8.6). Самовыравниванием процесса регулирования называется свойство регулируемого объекта после нарушения равновесия между притоком и расходом вернуться к этому состоянию самостоятельно, без участия человека или регулятора. Самовыравнивание способствует более быстрой стабилизации регулируемой величины и, следовательно, облегчает работу регулятора. Рассматривается объект с одним входом и одним выходом со свойствами: стационарности, линейности, сосредоточенности параметров. На вход подается ступенчатое воздействие и на выходе снимается кривая разгона. Необходимо решить **обратную** задачу: по известной кривой разгона определить коэффициенты уравнения.

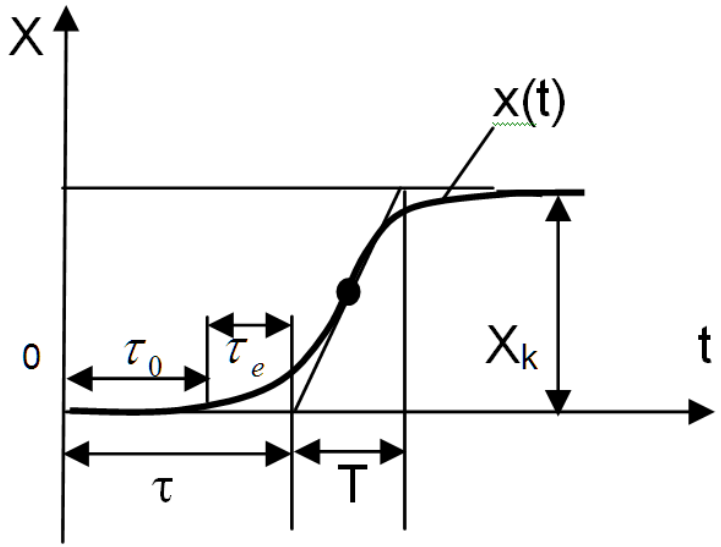


Рисунок .8.6 - . Единичная скачкообразная функция

В то случае, если нас устраивает вид уравнения (*), то его параметры находятся достаточно просто:

- коэффициент усиления - по формуле $C = \frac{X_K}{\Delta U}$, где X_K - установившееся значение выхода а ΔU – возмущение на входе объекта;
- постоянную времени Т – как проекцию касательной к кривой разгона в точке перегиба (см. рисунок .8.6);
- время запаздывания - τ как расстояния от точки 0 до пересечения касательной к кривой разгона в точке перегиба с осью времени (см. рисунок .8.6).

Проверка адекватности. Для решения этой проблемы надо выполнить моделирование функции выхода при передаточной функции объекта вида (*). Т.е. рассматривается объект с одним входом и одним выходом со свойствами: стационарности, линейности, сосредоточенности параметров. На вход подается ступенчатое воздействие и на выходе снимается кривая разгона. Необходимо решить прямую задачу по известной передаточной функции определить график кривой разгона. В данном простом примере достаточно воспользоваться уравнением (2.13)

$$\hat{X}(t) = C \cdot \Delta U \cdot \left[1 - \exp(-\frac{t-\tau}{T})\right] \text{(при} \quad t \geq \tau)$$

$$\hat{X}(t) = 0 \text{ (при} \quad t < \tau)$$

См. пример на следующей странице на рисунке 8.7, решенный с системе Mathcad. Если значение δ, найденное по следующей формуле, не превышает 3-7%, то модель считается адекватной:

$$\delta = \frac{100\%}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} \frac{X_i - \hat{X}_i}{X_i}$$

Если окажется, значение ошибки δ слишком велико, то надо изменить положение касательной на графике (не обязательно, чтобы она проходила через линию перегиба). Если и это не помогает, то надо применить более точный метод получения передаточной функции, например метод площадей (метод Симою).

Идентификация динамических характеристик объектов с самовыравниванием методом площадей [2-6]. Этот метод является одним из инженерных методов идентификации динамических характеристик объектов управления. Этот метод удобен как для реализации на ЭВМ, так и для ручного счета и обладает вполне удовлетворительной для практики точностью.

Метод предполагает идентификацию вне процесса управления, так как использует не результаты измерений при нормальной эксплуатации САУ, а требуется проведения специальных экспериментов по снятию кривой отклика объекта на ступенчатое возмущение на входе объекта. По этой экспериментально полученной кривой разгона определяется коэффициенты передаточной функции вида:

$$W(p) = C * W^* * e^{-p\tau_3} \qquad (8.10)$$

где:

$$W^* = \frac{b_1 + \sum_{i=1}^{M} b_{i+1} p^i}{a_1 + \sum_{i=1}^{N} a_{i+1} p^i} \qquad M \le N \qquad (8.11)$$

Коэффициент усиления объекта с самовыравниванием рассчитывается по формуле:

$$C = \frac{X_K}{\Delta U} \qquad (8.12)$$

Метод применим и для объекта без самовыравнивания .

$\begin{pmatrix} t \\ x \end{pmatrix} :=$

	Исходные данные		
№	t - время		x - выход
1	2,10	88,86	0,00
2	4,80	88,86	0,00
3	7,33	89,17	0,31
4	10,18	89,96	1,10
5	13,22	90,81	1,95
6	16,42	91,57	2,71
7	18,83	92,02	3,16
8	20,86	92,31	3,45
9	23,94	92,68	3,82
10	28,11	93,03	4,17
11	30,10	93,19	4,33
12	32,92	93,27	4,41
13	34,16	93,36	4,50
14	38,20	93,46	4,60
15	42,17	93,53	4,67
16	43,00	93,54	4,68
17	44,00	93,55	4,69
18	45,00	93,56	4,70
19	46,00	93,56	4,70
20	47,00	93,56	4,70

n -количество точек кривой разгона $n := 20$ $i := 1..n$

C - коэффициент усиления объекта $C := \frac{x_n}{10}$ $C = 0.47$

τ - время запаздывания объекта $\tau := 7.5$

T - постоянная времени объекта $T := 10$

Исходная кривая разгона аппроксимируется переходным процессом в апериодическом звене с передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{C}{1 + T \cdot p} \cdot \exp(-p \cdot \tau)$$

и переходным процессом:

$$\hat{X}(t) = C \cdot \Delta U \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t - \tau}{T}\right)\right] \quad \text{для} \quad t \geq \tau \quad \text{или}$$

$$X_i := \text{if}\left[t_i < \tau, 0, C \cdot 10 \cdot \left[1 - \exp\left[\frac{-(t_i - \tau)}{T}\right]\right]\right]$$

Проверка адекватности:

$$\delta := \left(\frac{100}{n}\right) \sum_{i=1}^{n} \frac{(x_i - X_i)}{x_i} \qquad \delta 1 := \left(\frac{100}{n}\right) \sum_{i=1}^{n} \frac{(|x_i - X_i|)}{x_i}$$

$\delta 1 = 6.773$

$\delta = 5.838$

Сплошная линия - исходная кривая разгона, пунктирная линия - результат аппроксимации

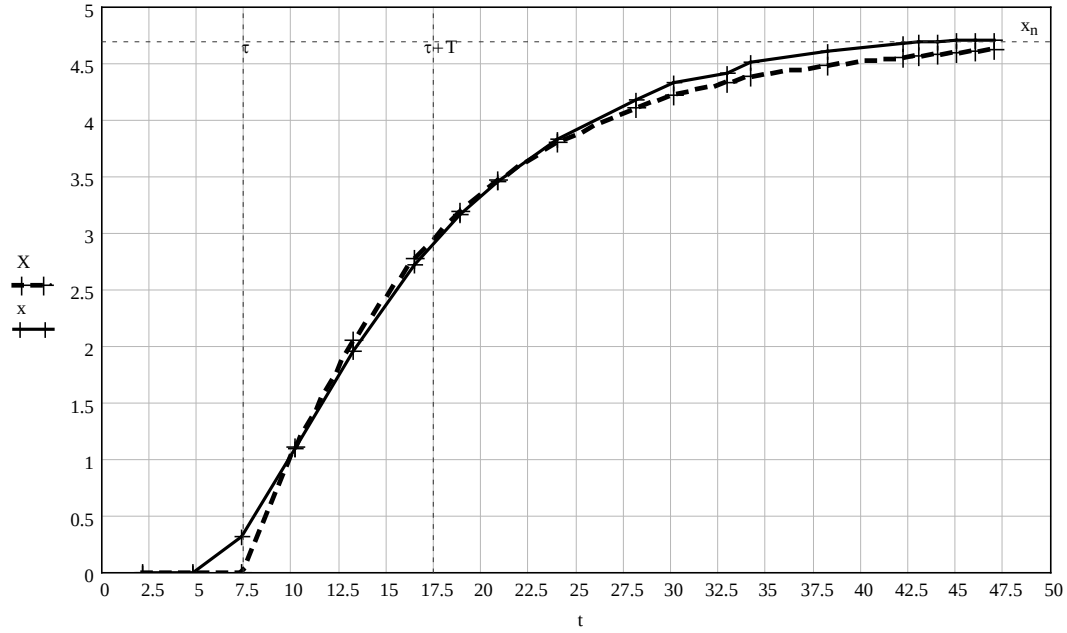


Рисунок .8.7 – Пример проверки адекватности

Время чистого запаздывания τ_3 определяется из графика кривой разгона как время, прошедшее с момента нанесения возмущения до появления реакции на выходе объекта.

Метод площадей позволяет определить коэффициенты ai, bi, M, N, входящие в (8.11).

Рассмотрим применение метода площадей для определения математической модели стационарного линейного объекта с одним входом и одним выходом, имеющего структурную схему вида:



На рисунке 8.8 показана полученная в результате эксперимента кривая разгона. Для обработки используется часть кривой разгона начина с момента времени t=τ_3, представленная дискретными значениями выхода X_i, задаваемыми с шагом по времени Δt. Точка t=τ_3 принимается за новое начало координат.

При расчетах используется кривая разгона в нормированном виде , которая получается из исходной по формуле :

$Z_i = 1-X_i/X_k$ (8.13)

Суть метода площадей сводится к разложению функции $(W^*)^{-1}$ в усеченный ряд по степеням p, то есть к разложению:

$$W^*(p)^{-1} = \frac{1}{W^*(p)} = 1 + \sum_{i=1}^{N} F_i p_i \qquad (8.14)$$

Интегральные площади F_i, входящие в(5) вычисляются по формулам:

$$F1 = \int_0^\infty Z(t)dt \qquad (8.15)$$

$$F2 = \int_0^\infty \int_0^t Z(t)dt^2 = F_1^2 \int_0^\infty Z(t)(1-\theta)d\theta \qquad (8.16)$$

$$F3 = \int_0^\infty \int_0^t \int_0^t Z(t)dt^3 = F_1^3 \int_0^\infty Z(t)(1-2\theta+\frac{\theta^2}{2})d\theta \qquad (8.17)$$

Величины F_i определяются методами численного интегрирования. Например, если воспользоваться методом трапеций, то:

$F_1 = \Delta t\ (S_1-0.5)$ (8.18)

$F_2 = F_1 \Delta t\ (S_2-0.5)$ (8.19)

$F_3 = F_1^{2}\,\Delta t\ (S_3\text{-}0.5)$ (8.20)

.....

$F_l = F_1^{l-1}\,\Delta t\ (S_l\text{-}0.5)$ (8.21)

$$S_1 = \sum_{i=1}^{k} Z_i \qquad (8.22)$$

$$S_2 = \sum_{i=1}^{k} Z_i (1-\theta_i) \qquad (8.23)$$

$$S_3 = \sum_{i=1}^{k} Z_i \left(1-2\theta_i + \frac{\theta_i^{2}}{2}\right) \qquad (8.24)$$

$$S_4 = \sum_{i=1}^{k} Z_i \left(\frac{F_3}{F_1^{3}} - \frac{F_2}{F_1^{2}}\theta_i + \frac{\theta_i^{2}}{2!} - \frac{\theta_i^{3}}{3!}\right) \qquad (8.25)$$

– – – – – – – – – – – – – – – – – – –

$$S_l = \sum_{i=1}^{k} Z_i \left(\frac{-\theta_i^{\,l-1}}{(l-1)!} + \frac{-\theta_i^{\,l-2}}{(l-2)!} + \sum_{j=0}^{l} \frac{F_{l-j-1}(-\theta^{i})}{F_1^{\,l-j-1}\,j!}\right) \qquad (8.26)$$

$$\theta_i = t_i/F_1 \qquad (8.27)$$

Таким образом, имеем значения Z_1, Z_2, Z_k, нетрудно рассчитать F_i.

Порядок передаточной функции N можно определить из условия, что если F_i мало по сравнению с F_{i-1}, или если $F_i < 0$, то N=i-1.

Величина M определяется из условий :

Если X(0)=0, а X’(0)#0, то M=N-1

Если X(0)=X’(0)=0, то M<=N-2

Если X(0)=X’(0)=X’’(0), то b2=b3=b4=...=0

Значения коэффициентов bi и ai находятся решением системы уравнений:

$a_1=1;\ b_1=1$

$a_2=F_1+b_2$

$a_3=F_2+b_3+b_2F_1$

$a_4=F_3+b_4+b_3F_1+b_2F_2$ (8.28)

.....

$$a_l = F_{l-1} + b_l + \sum_{j=2}^{l-1} b_j F_{l-j}$$

В этой системе необходимо подставить нули вместо каждого ai или bi при j>N+1 и j>M+1,а затем решить относительно ai и bi.

При ручном счете обычно ограничиваются вычислением F1,F2,F3 и принимают, что если F3<0, или если X'(0)#0, то M=1, N=2 , то есть передаточная функция W*(p) имеет вид :

$$W^*(p) = \frac{b_1 + b_2 p}{a_1 + a_2 p + a_3 p^2} \qquad \text{…. (8.29)}$$

где:

$b_1=1$; $b_2=-F_3/F_2$; $a_1=1$

$a_2=F_1+b_2$; $a_3=F_2+b_2F$ (21)

а если X'(0)=0 и $F_3>0$, то M=0 ,N=3 , а передаточная функция имеет вид :

$$W^*(p) = \frac{1}{a_1 + a_2 p + a_3 p^2 + a_4 p^3} \qquad (8.30)$$

где :

$b_1=1$; $a_1=1$; $a_2=F_1$; $a_3=F_2$; $a_4=F_3$ (8.31)

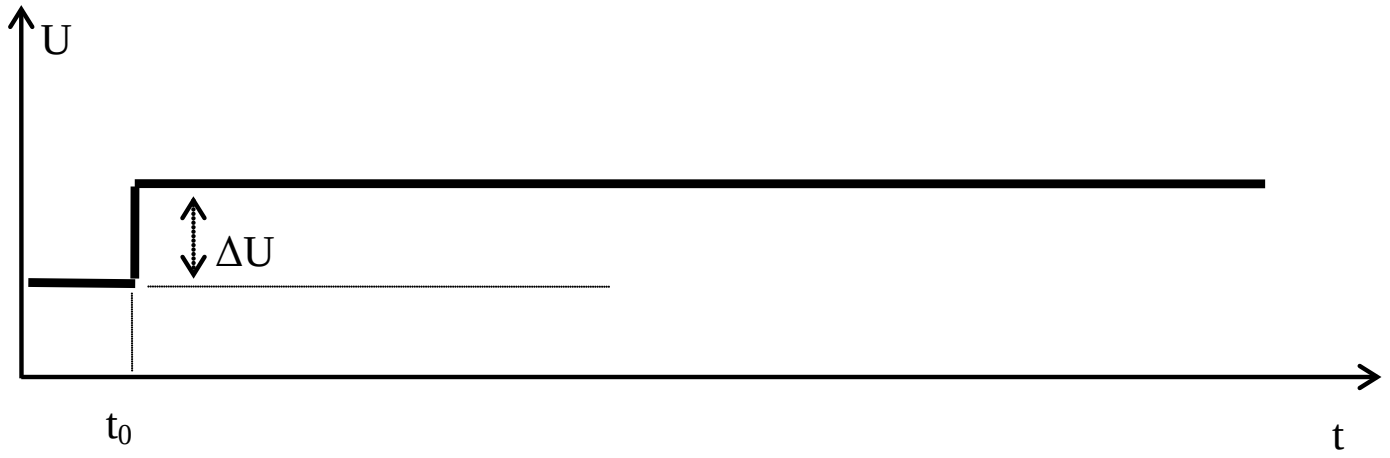


Рисунок. 8.8А - Возмущение на входе объекта

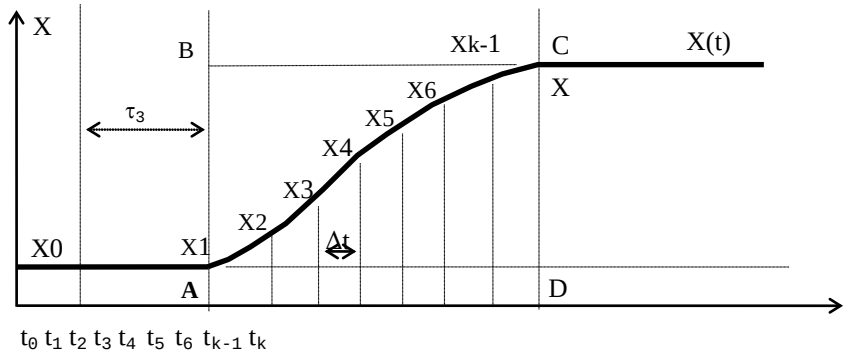


Рисунок 8.8б - Кривая разгона объекта с самовыравниванием

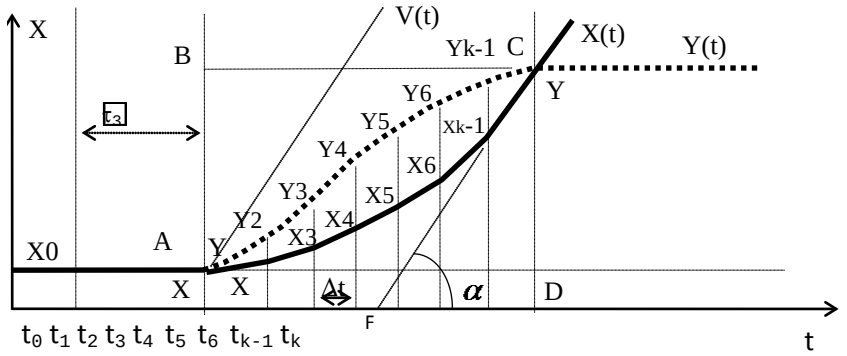


Рисунок 8.8в - Кривая разгона объекта без самовыравнивания

При ручном счете удобно заносить результаты в таблицу вида:

Таблица 8.4.

t_i	X_i	Z_i	θ_i	$1-\theta_i$	$Z_i(1-\theta_i)$	$1-2\theta_i+\theta_i^2/2$	$Z_i(1-2\theta_i+\theta_i^2/2)$
1	2	3	4	5	6	7	8

Эта таблица содержит К строк. Первые два столбца содержат исходные данные - точки времени и значения выхода. Сумма чисел столбца 4 даст значения S_1, сумма столбца 6- S_2, сумма столбца 8 - S_3.

См. также примеры, приведенные в лабораторной работе №5 [3], где рассмотрены и объекты без самовыравнивания.

Идентификация динамического объекта управления по импульсной характеристике. Иногда по технологическим условиям нельзя длительное время держать «единичный скачок» на входе объекта. Тогда подается возмущение типа «единичного импульса», длительность которого достаточна для заметного изменения выходного сигнала. Практически «единичный импульс» рассматривается как два последовательных «единичных скачка», только первый имеет значение (+1), а второй – (-1). Полученная на объекте экспериментальная импульсная характеристика – график изменения во времени выходного сигнала объекта путем несложных графических преобразований достраивается до экспериментальной кривой разгона и далее поиск математической модели – $W_{об}(p)$ идет по указанному выше пути. Перестройка импульсной характеристики объекта до экспериментальной кривой разгона идет так:

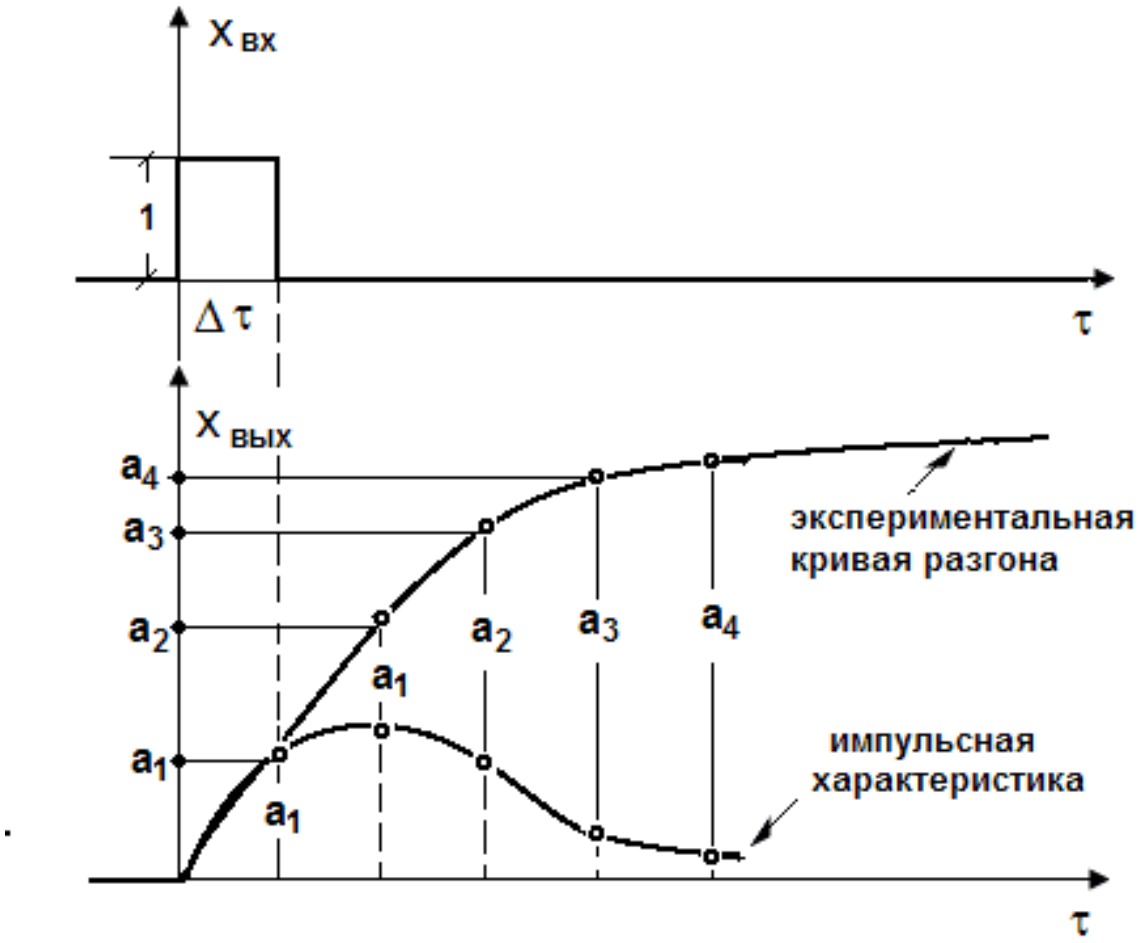


Рисунок .8.6 - Схема преобразования экспериментальной импульсной характеристики в кривую разгона

Основная литература

1. Построение математических моделей химико-технологических процессов. Под ред. Дудникова Е.Г. - Л.: Химия, 1970. –312 с.
2. Практикум по автоматике и системам управления производственными процессами: учеб. пособие для вузов /под ред. И.М.Масленникова. -М.: Химия, 1986. -336с.

Дополнительная литература

3. Инков А.М. Моделирование и идентификация объектов управления. Методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов спец. 050702. Шымкент, ЮКГУ, 2010 г., -78 с.