

EE2090: Kỹ thuật điện & Điều khiển quá trình

Chương 2: Mô hình quá trình



Nội dung chương 2

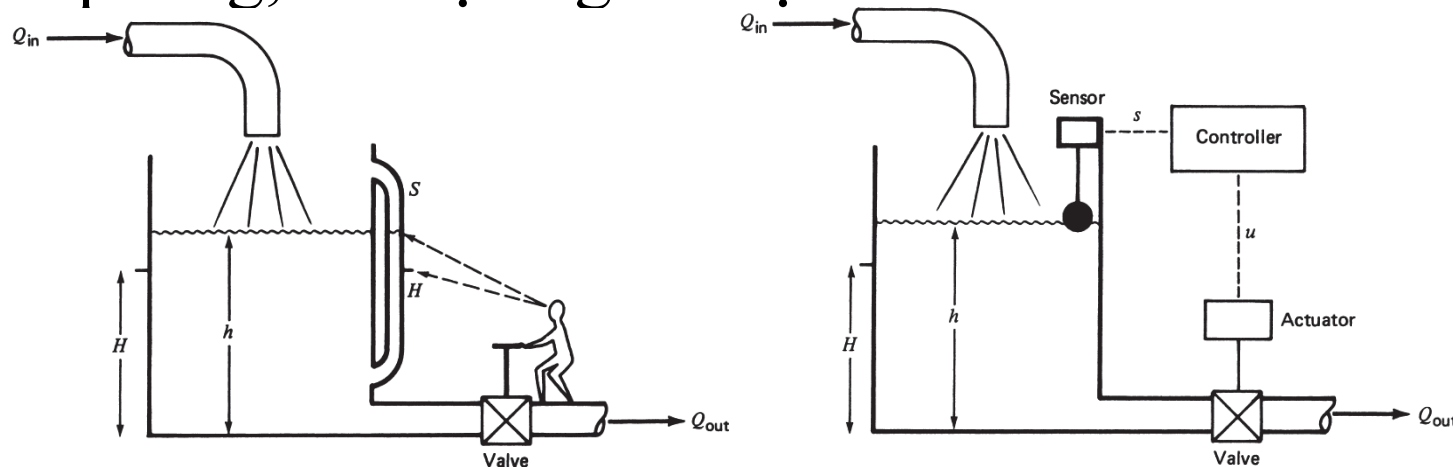
- 2.1 Giới thiệu chung
- 2.2 Các khâu động học cơ bản
- 2.3 Các bước xây dựng mô hình lý thuyết
- 2.4 Tuyến tính hóa mô hình
- 2.5 Mô phỏng quá trình (sử dụng MATLAB & Simulink)

2.1 Giới thiệu chung

- Mô hình là một hình thức mô tả khoa học và cô đọng các khía cạnh thiết yếu của một hệ thống thực, có thể có sẵn hoặc cần phải xây dựng.
- Một mô hình phản ánh hệ thống thực từ một góc nhìn nào đó phục vụ hữu ích cho mục đích sử dụng.
- Phân loại mô hình:
 - Mô hình đồ họa: Sơ đồ khối, lưu đồ P&ID, lưu đồ thuật toán
 - Mô hình toán học: ODE, hàm truyền, mô hình trạng thái
 - Mô hình máy tính: Chương trình phần mềm
 - Mô hình suy luận: Cơ sở tri thức, luật
- Trong nội dung chương 2 ta quan tâm tới xây dựng mô hình toán học cho các quá trình công nghệ.

Mục đích sử dụng mô hình

1. Hiểu rõ hơn về quá trình
2. Thiết kế cấu trúc/sách lược điều khiển và lựa chọn kiểu bộ điều khiển
3. Tính toán và chỉnh định các tham số của bộ điều khiển
4. Xác định điểm làm việc tối ưu cho hệ thống
5. Mô phỏng, đào tạo người vận hành

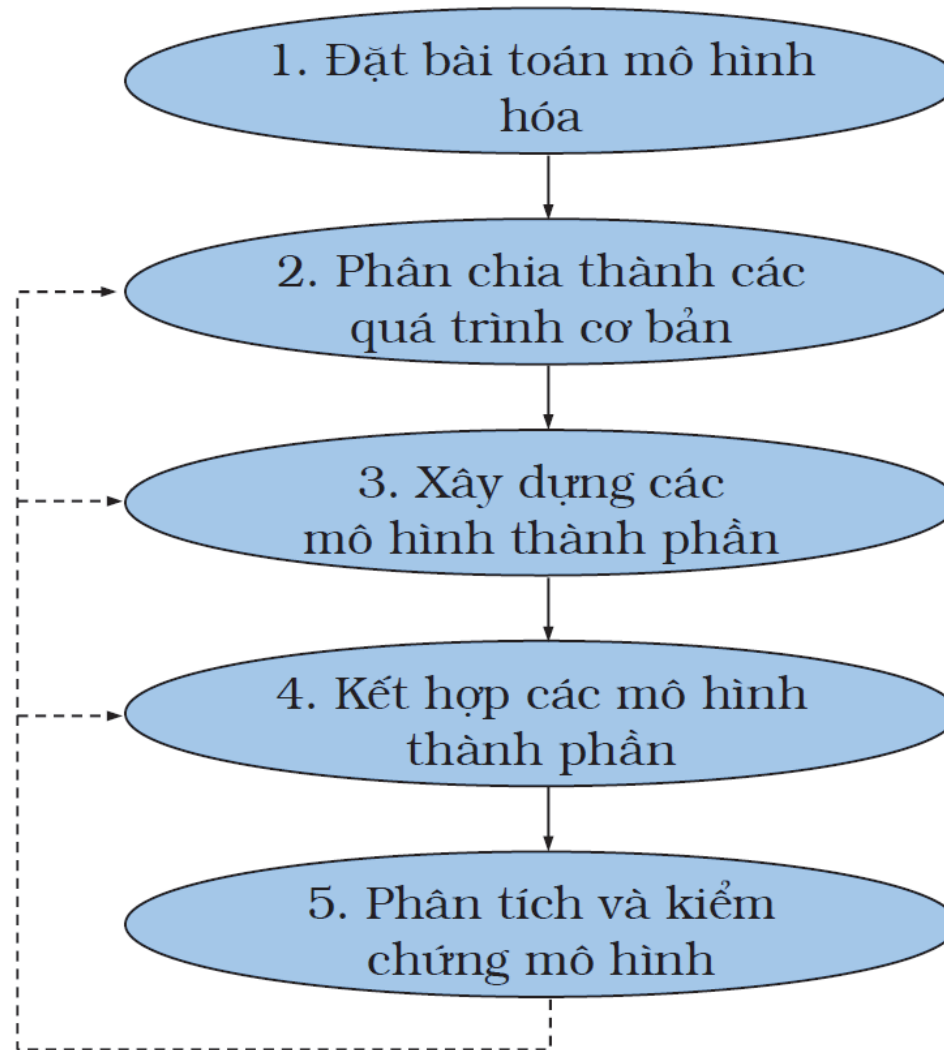


Thế nào là một mô hình tốt



- Chất lượng mô hình thể hiện qua:
 - Tính trung thực của mô hình: Mức độ chi tiết và mức độ chính xác của mô hình
 - Giá trị sử dụng (phù hợp theo mục đích sử dụng)
 - Mức độ đơn giản của mô hình
- “Essentially, all models are wrong, but some are useful.”
 - Box, George E. P
- Một mô hình tốt cần đơn giản nhưng thu tóm được các đặc tính thiết yếu cần quan tâm của thế giới thực trong một ngữ cảnh sử dụng.

Tổng quan quy trình mô hình hóa



Phương pháp xây dựng mô hình toán học



- Phương pháp lý thuyết (*mô hình hóa lý thuyết, phân tích quá trình, mô hình hóa vật lý*):
 - Xây dựng mô hình trên nền tảng các định luật vật lý, hóa học cơ bản
 - Phù hợp nhất cho các mục đích 1., 2. và 5. (tìm hiểu, thiết kế, mô phỏng, đào tạo)
 - **Ưu điểm:** Giúp hiểu sâu hơn về bản chất bên trong của quá trình và các mối liên quan trực tiếp tới các hiện tượng vật lý, hóa học hoặc sinh học. Cho phép xác định được tương đối chính xác cấu trúc của quá trình.
 - **Nhược điểm:** Khó xây dựng được mô hình cho các quá trình phức tạp tuân theo các bước bài bản thống nhất, phụ thuộc vào quá trình cụ thể, đòi hỏi kinh nghiệm, công sức thời gian.

Phương pháp xây dựng mô hình toán học



- Phương pháp thực nghiệm (*nhận dạng quá trình, phương pháp hộp đen*):
 - Ước lượng mô hình trên cơ sở các quan sát số liệu vào ra thực nghiệm
 - Phù hợp nhất cho các mục đích 3. và 4. (chỉnh định, tối ưu hóa)
 - **Ưu điểm:** cho phép xác định tương đối chính xác các tham số mô hình trong trường hợp cấu trúc mô hình biết trước. Có nhiều công cụ phần mềm hỗ trợ rất mạnh (online/offline).
 - **Nhược điểm:** phụ thuộc vào độ tin cậy của phép đo, phải có giả thiết về các lớp mô hình thích hợp (nếu không có phải thực hiện phép “chọn thử”)
- Phương pháp kết hợp:
 - Mô hình hóa lý thuyết để xác định cấu trúc mô hình
 - Mô hình hóa thực nghiệm để ước lượng các tham số mô hình

Các dạng mô hình

- Mô hình tuyến tính/Mô hình phi tuyến
- Mô hình tuyến tính:
 - Có quan hệ giữa các tín hiệu vào/ra thỏa mãn nguyên lý xếp chồng:
$$M(u_1 + u_2) = M(u_1) + M(u_2)$$
 - Biểu diễn bằng phương trình vi phân tuyến tính, mô hình hàm truyền, mô hình trạng thái tuyến tính, đáp ứng quá độ, đáp ứng tần số...
 - Đơn giản cho phân tích và thiết kế điều khiển với các công cụ toán học rất phong phú

Các dạng mô hình

- Mô hình tuyến tính/Mô hình phi tuyến
- Mô hình phi tuyến:
 - Chỉ cần bất cứ một quan hệ vào/ra nào không thỏa mãn nguyên lý xếp chồng
 - Biểu diễn bằng phương trình vi phân (phi tuyến), mô hình trạng thái
 - Phổ biến trên thực tế, phức tạp \Rightarrow tuyến tính hóa

Các dạng mô hình

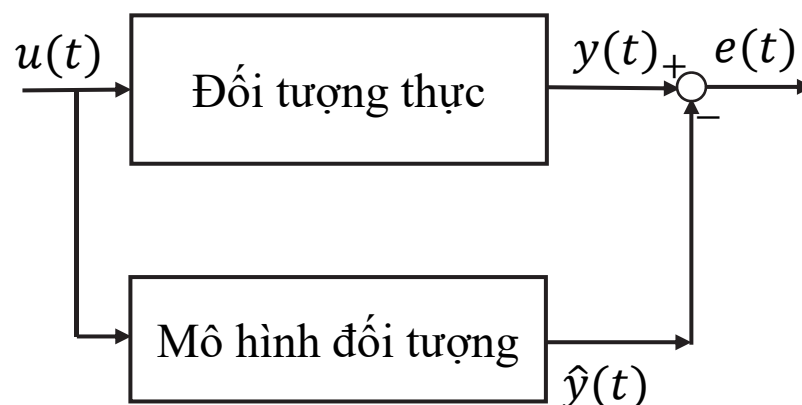
- Mô hình đơn biến/Mô hình đa biến
- Mô hình đơn biến:
 - Một biến vào điều khiển và một biến ra được điều khiển
 - Biến vào-ra được biểu diễn là các đại lượng vô hướng
 - Biểu diễn bằng hàm truyền đạt và hàm quá độ (chỉ có ý nghĩa cho hệ tuyến tính) hoặc phương trình vi phân
- Mô hình đa biến:
 - Nhiều biến vào điều khiển hoặc/và nhiều biến ra
 - Các biến vào-ra có thể được biểu diễn dưới dạng vector
 - Biểu diễn bằng hệ phương trình vi phân, ma trận hàm truyền đạt, và ma trận hàm quá độ

Phân loại mô hình (tiếp)

- Mô hình tham số hằng/ Mô hình tham số biến thiên:
 - Mô hình tham số hằng: các tham số mô hình không thay đổi theo thời gian
 - Mô hình tham số biến thiên: ít nhất 1 tham số mô hình thay đổi theo thời gian
- Mô hình tham số tập trung / Mô hình tham số rải:
 - Mô hình tham số tập trung: các tham số mô hình không phụ thuộc vào vị trí, có thể biểu diễn mô hình bằng (hệ) phương trình vi phân thường (OEDs)
 - Mô hình tham số rải: ít nhất một tham số mô hình phụ thuộc vị trí, biểu diễn mô hình bằng (hệ) phương trình vi phân đạo hàm riêng
- Mô hình liên tục / mô hình gián đoạn:
 - Mô hình liên tục mô tả quan hệ giữa các biến quá trình liên tục theo thời gian
 - Mô hình gián đoạn: phản ánh đặc tính tại những thời điểm nhất định

2.2 Các khâu động học cơ bản

- Định nghĩa hàm truyền đạt, hàm quá độ
- Các khâu động học cơ bản:
 - Khâu quán tính bậc nhất
 - Khâu quán tính tích phân bậc nhất
 - Khâu quán tính bậc hai
 - Khâu khâu dao động bậc hai
 - Khâu trễ
 - Khâu quán tích bậc nhất có trễ



Hàm truyền đạt

- Phương trình vi phân mô tả quan hệ vào ra:

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m u(t-\theta)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} u(t-\theta)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{du(t-\theta)}{dt} + b_0 u(t-\theta)$$

- *Hàm truyền đạt* là một hàm biến phức biểu diễn quan hệ vào-ra của một hệ tuyến tính (đơn biến):

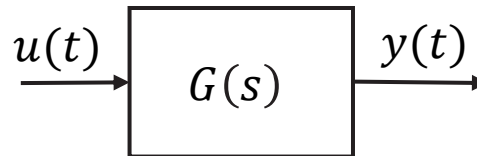
$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad \begin{array}{c} u(t) \\ \hline U(s) \end{array} \rightarrow \boxed{G(s)} \rightarrow \begin{array}{c} y(t) \\ \hline Y(s) \end{array}$$

với toàn bộ sớ kiện bằng 0

- Áp dụng biến đổi Laplace cho cả hai vế:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0)} e^{-\theta s}$$

Hàm quá độ



- Hàm quá độ $h(t)$ là đáp ứng của hệ thống khi hệ ở trạng thái 0 (có các giá trị đầu = 0) bởi một *tín hiệu bậc thang Heaviside* (unit step)

$$1(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases}$$

- $1(t)$ có ảnh Laplace $1(s) = \frac{1}{s}$
- Giả sử hệ thống có hàm truyền $G(s)$, hàm quá độ $h(t)$ có ảnh Laplace

$$H(s) = Y(s) = G(s)1(s) = \frac{G(s)}{s}$$

- Tín hiệu ra bất kỳ

$$y(t) = \mathcal{L}^{-1}\{G(s)U(s)\} = \mathcal{L}^{-1}\{sH(s)U(s)\}$$

Khâu quán tính bậc nhất

- Khâu quán tính bậc nhất có hàm truyền

$$G(s) = \frac{k}{1+Ts} \text{ với } k, T > 0$$

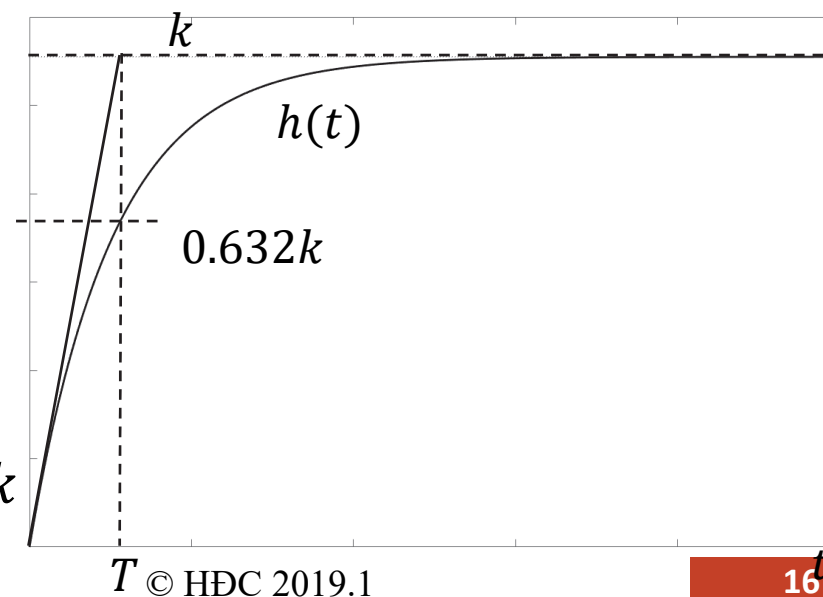
- Trong đó k được gọi là *hệ số khuếch đại* và T là *hằng số thời gian*

- $T \frac{dy}{dt} + y(t) = ku(t)$

- Hàm quá độ của khâu quán tính bậc nhất:

$$h(t) = k(1 - e^{-\frac{t}{T}})$$

- Cần xác định k, T :
 - Kẻ tiếp tuyến với $h(t)$
 - Chọn T tại điểm có $h(t) = 0.632k$



Khâu quán tính tích phân bậc nhất

- Khâu tích phân – quán tính bậc nhất có hàm truyền

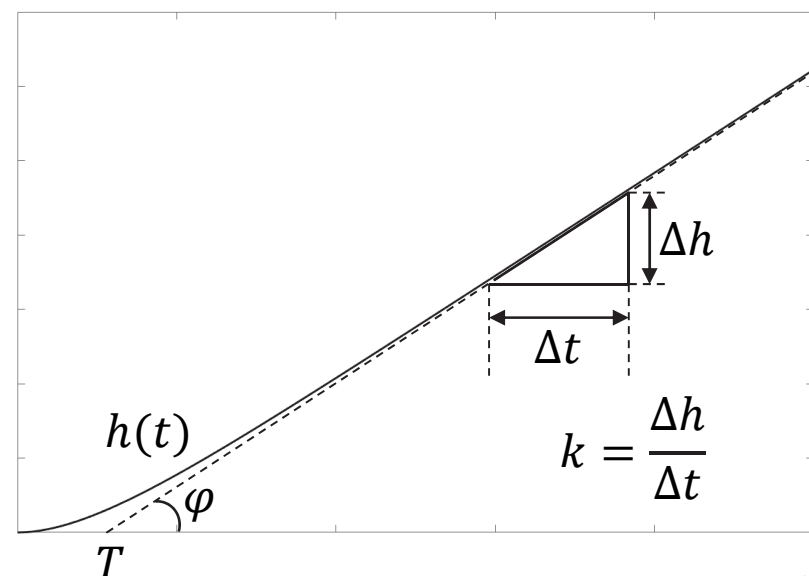
$$G(s) = \frac{k}{s(1 + Ts)}$$

- Hàm quá độ

$$h(t) = k \left[t - T \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \right]$$

- Xác định k, T:

- Kẻ đường tiệm cận với $h(t)$ cắt trục t tại T
- $k = \tan \varphi$



Khâu quán tính bậc 2

- Khâu quán tính bậc 2 có hàm truyền

$$G(s) = \frac{k}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)}, T_1 > T_2$$

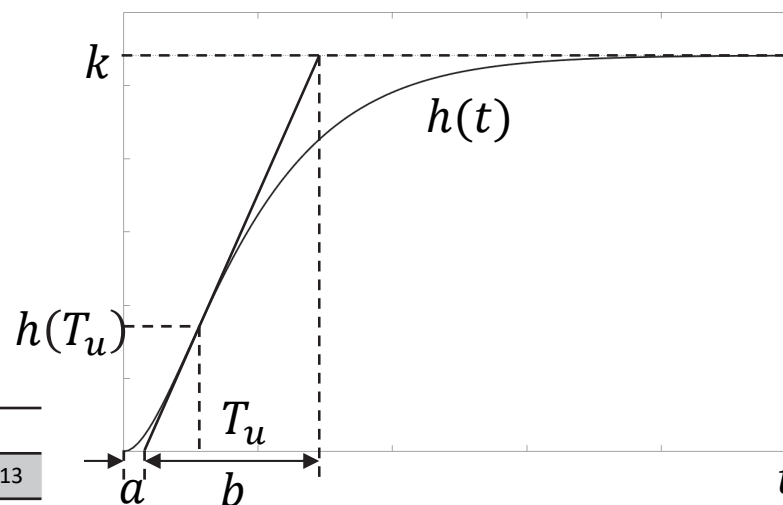
- Hàm quá độ của khâu quán tính bậc 2

$$h(t) = k \left[1 - \frac{T_1 e^{-\frac{t}{T_1}} - T_2 e^{-\frac{t}{T_2}}}{T_1 - T_2} \right]$$

- Xác định k, T_1, T_2 :

- $k = h(\infty)$
- Kẻ tiếp tuyến tại điểm uốn: a, b
- Nếu $\frac{a}{b} \geq 0.103648 \Rightarrow$ dùng, mô hình không phù hợp
- Tìm x với $0 < x < 1$ từ $\frac{a}{b}$ tức (tra bảng):
 $x = f_2^{-1} \left(\frac{a}{b} \right)$ với $\frac{a}{b} = f_2(x) = x^{x/(1-x)} \frac{x \ln x + x^2 + 1}{x - 1} - 1$
- $T_1 = \frac{b}{f_1(x)}$ với $f_1(x) = \frac{a}{x^{x-1}}$
- $T_2 = xT_1$

a/b	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
x	0.012	0.0275	0.0467	0.707	0.1008	0.1393	0.1904	0.2622	0.3740	0.6113



Khâu dao động bậc 2

- Khâu dao động bậc 2 có hàm truyền

$$G(s) = \frac{k}{1 + 2DT_s + T^2s^2} = \frac{k}{(Ts + D)^2 + 1 - D^2}, 0 < D < 1$$

- Hàm quá độ của khâu quán tính bậc 2

$$h(t) = k \left[1 - \frac{e^{-\frac{Dt}{T}}}{\sqrt{1 - D^2}} \sin \left(\frac{\sqrt{1 - D^2}t}{T} + \arccos D \right) \right]$$

- Xác định k, T, D :

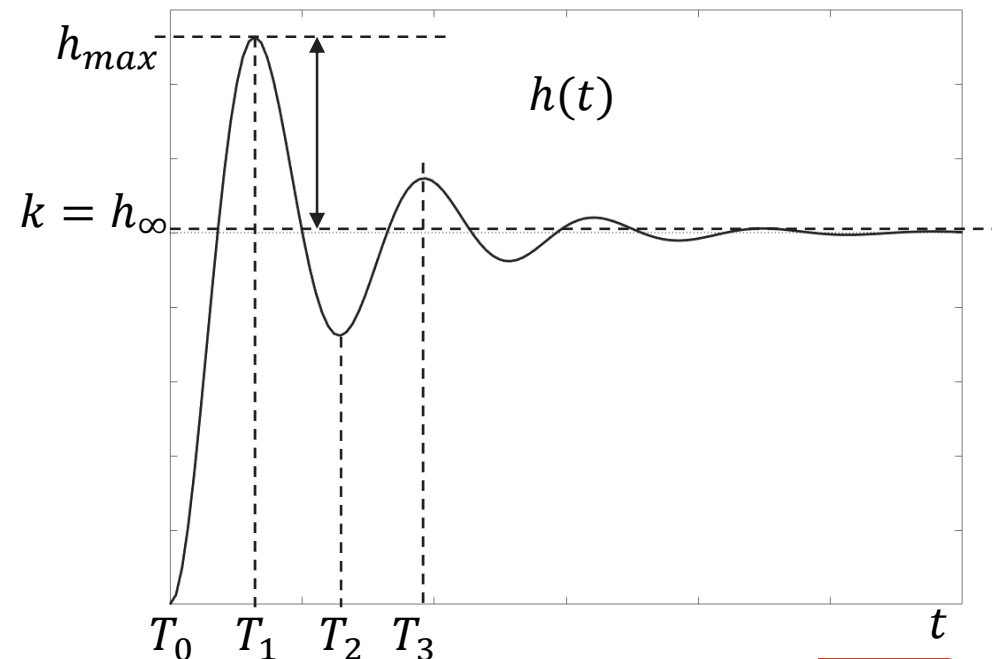
- $k = h(\infty) = h_\infty$

- $T_i = i\pi T / \sqrt{1 - D^2}$

- $h_{max} = h(T_1) = k[1 + e^{-\pi D / \sqrt{1 - D^2}}]$

- $\Delta h = h_{max} - h_\infty \Leftrightarrow D = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\pi^2}{\ln^2 \left| \frac{\Delta h}{k} \right|}}}$

- $T_1 = \frac{\pi T}{\sqrt{1 - D^2}} \Leftrightarrow T = \frac{T_1 \sqrt{1 - D^2}}{\pi}$



Khâu có trễ

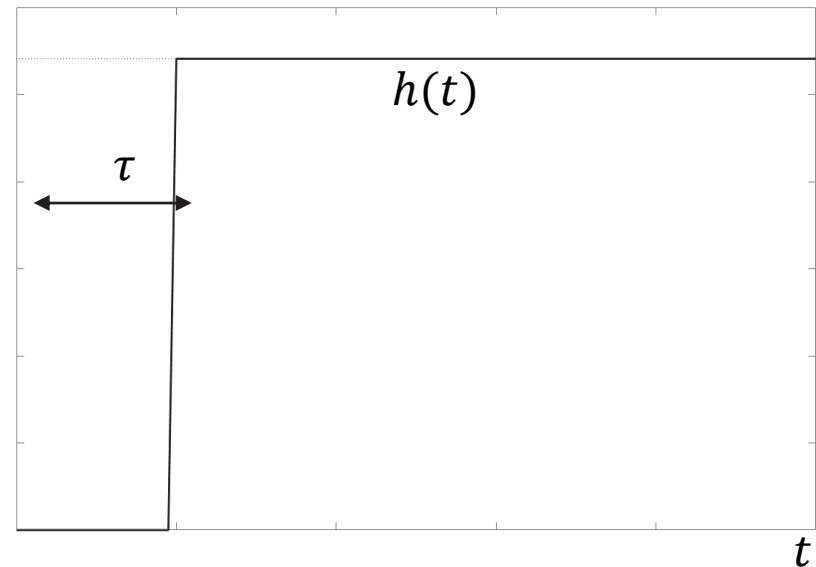
- Khâu trễ là một hệ động học cơ bản có quan hệ giữa tín hiệu vào $u(t)$ và ra $y(t)$ là $y(t) = u(t - \tau)$
- Hàm truyền đạt: $G(s) = e^{-s\tau}$
- Công thức xấp xỉ:

$$- G(s) = e^{-\tau s} \approx \frac{1}{(1+Ts)^n}, T = \frac{\tau}{n}$$

Hoặc

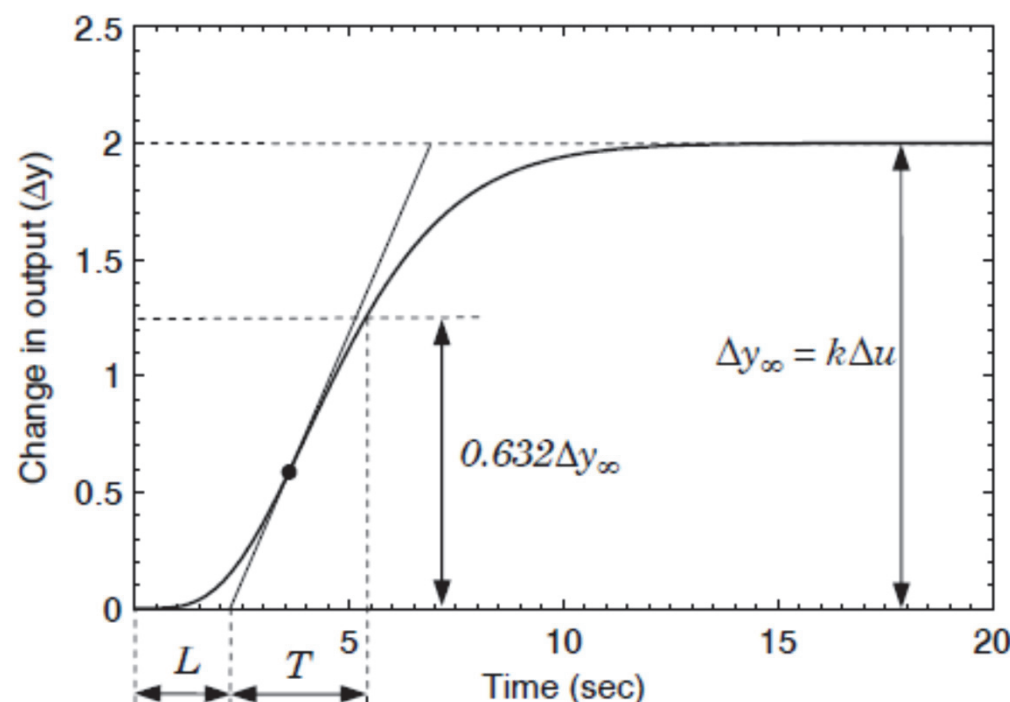
$$- G(s) = e^{-\tau s} \approx \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0)}$$

(công thức Pade)



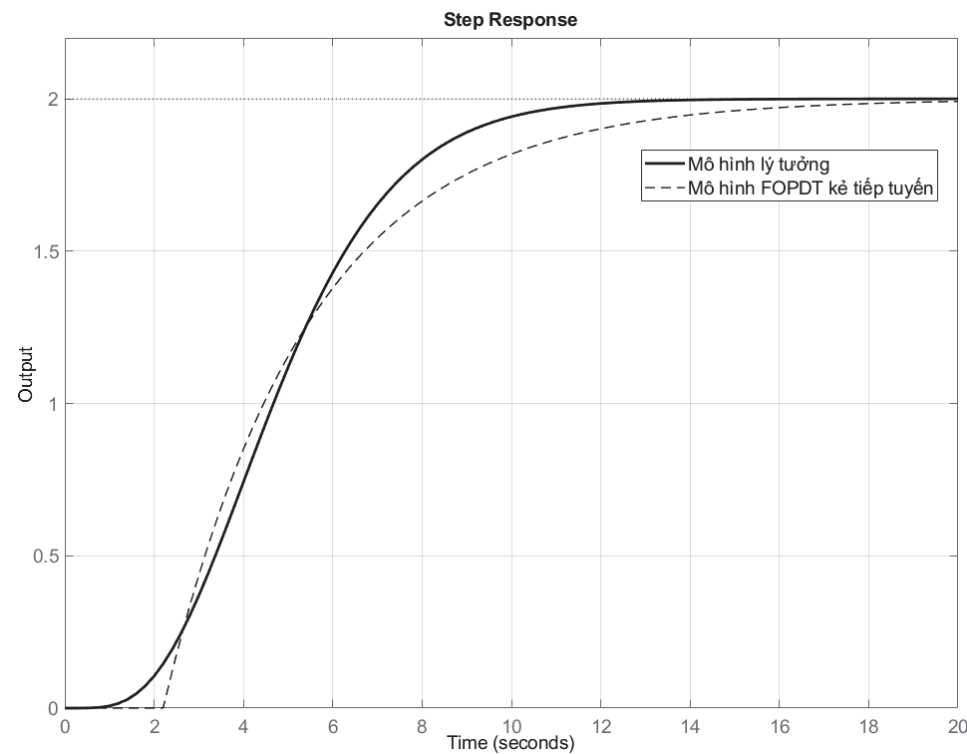
Mô hình quán tính bậc nhất có trễ

- Mô hình FOPDT: $\hat{G}(s) = \frac{k}{1+Ts} e^{-Ls}$
- Phương pháp kẻ tiếp tuyến



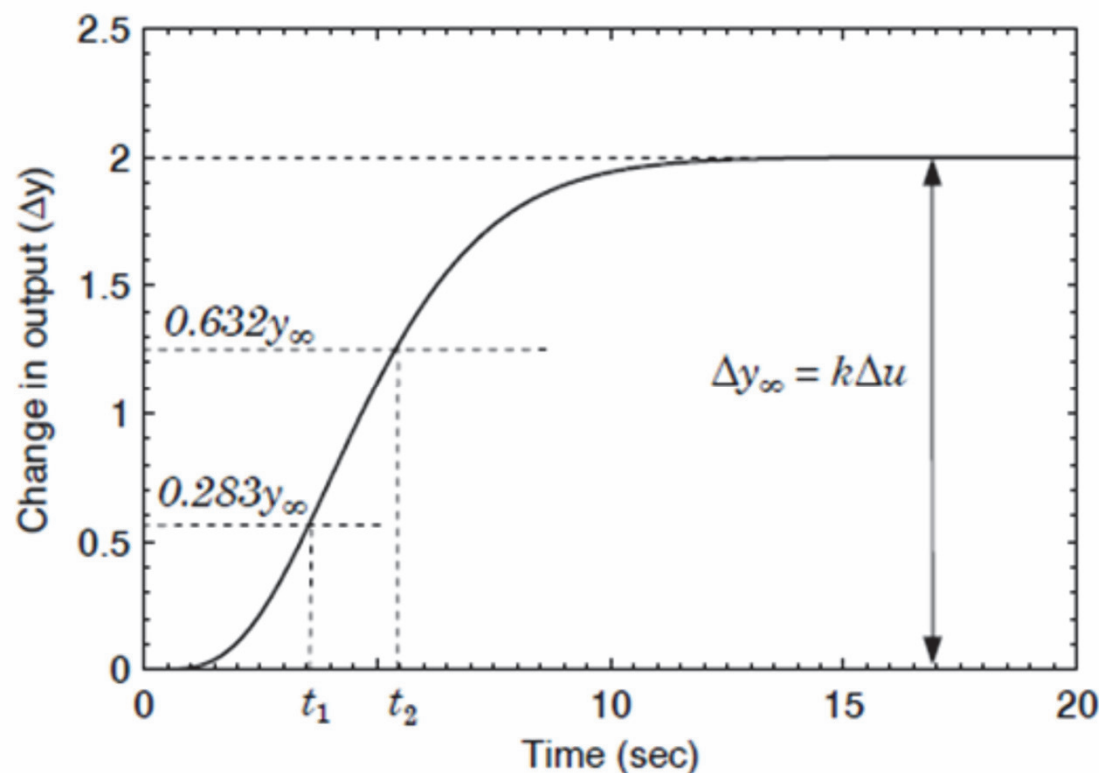
Ví dụ:

- Quá trình có mô hình lý tưởng $G(s) = \frac{2}{(s+1)^5}$
- Mô hình ước lượng: $\hat{G}(s) = \frac{2}{1+3.25s} e^{-2.2s}$



Mô hình quán tính bậc nhất có trễ

- Mô hình FOPDT: $\hat{G}(s) = \frac{k}{1+Ts} e^{-Ls}$
- Phương pháp hai điểm qui chiếu

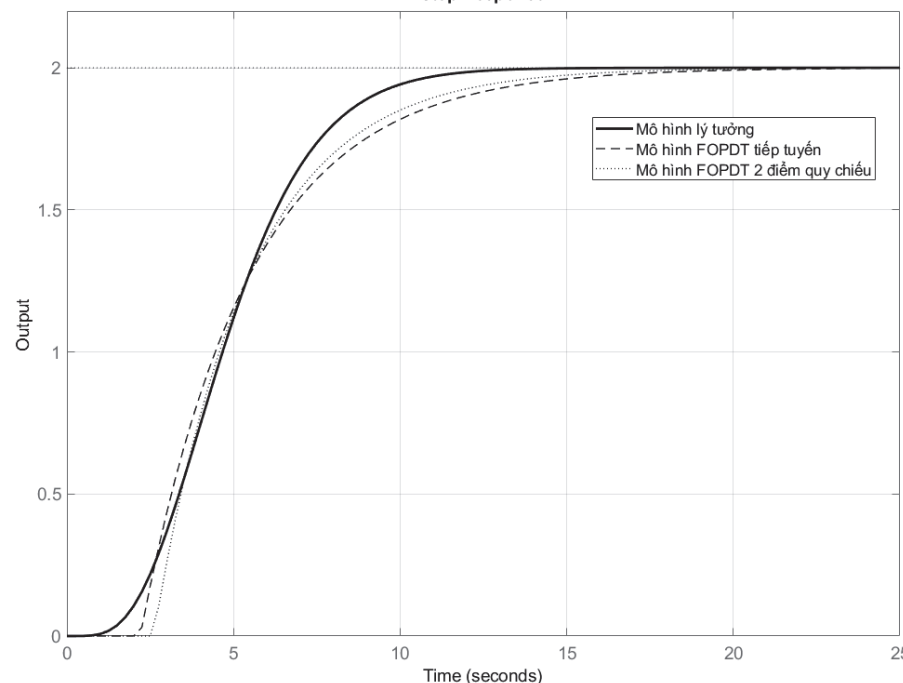


$$T = 1.5(t_2 - t_1)$$

$$L = 1.5(t_1 - t_2/3) = t_2 - T$$

Ví dụ

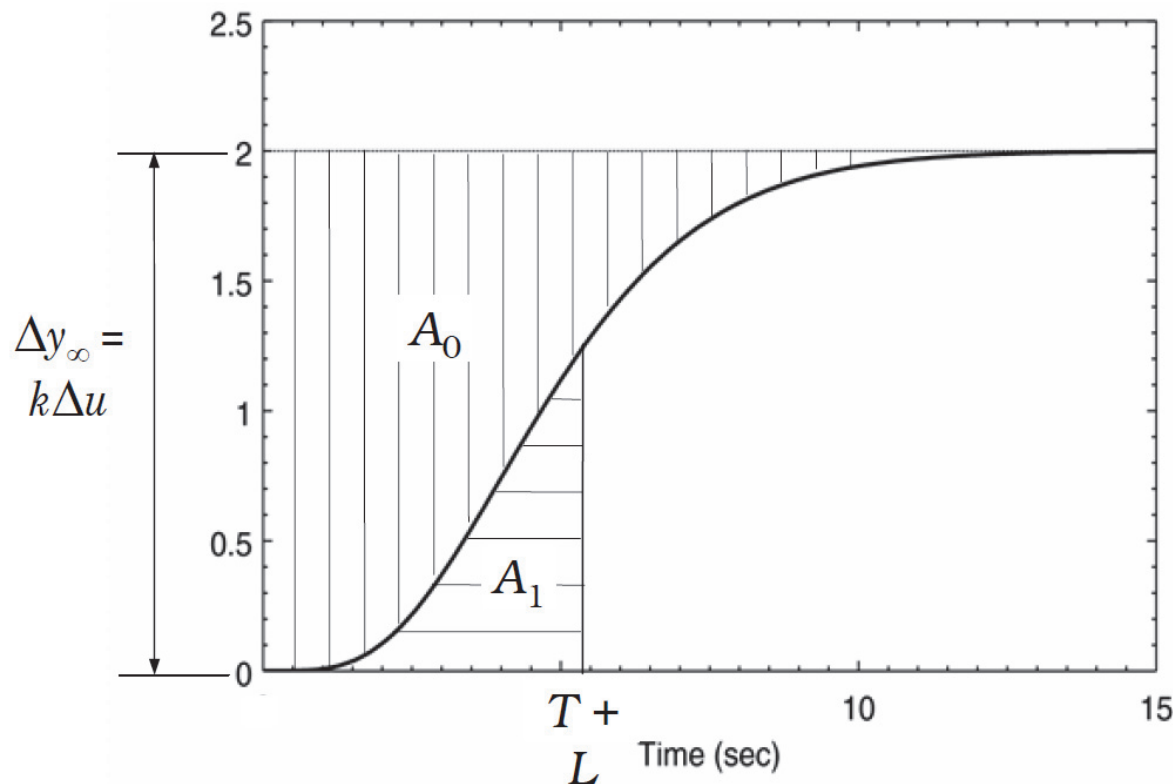
- Quá trình có mô hình lý tưởng: $G(s) = \frac{2}{(s+1)^5}$
 $t_1 = 3.55 [s], t_2 = 5.45 [s]$
 $\Rightarrow T = 1.5(5.4 - 3.5)$ và $L = 5.45 - 2.85 = 2.66$
- Mô hình ước lượng: $\hat{G}(s) = \frac{2}{1+2.85s} e^{-2.6s}$



Mô hình quán tính bậc nhất có trễ



- Mô hình FOPDT: $\hat{G}(s) = \frac{k}{1+Ts} e^{-Ls}$
- Phương pháp diện tích



$$T + L = \frac{A_0}{k\Delta u} = \frac{\int_0^{t_\infty} [\Delta y_\infty - \Delta y(t)] dt}{k\Delta u}$$

$$T = \frac{eA_1}{k\Delta u} = \frac{\int_0^{T+L} \Delta y dt}{k\Delta u}$$

Mô hình quán tính bậc nhất có trễ

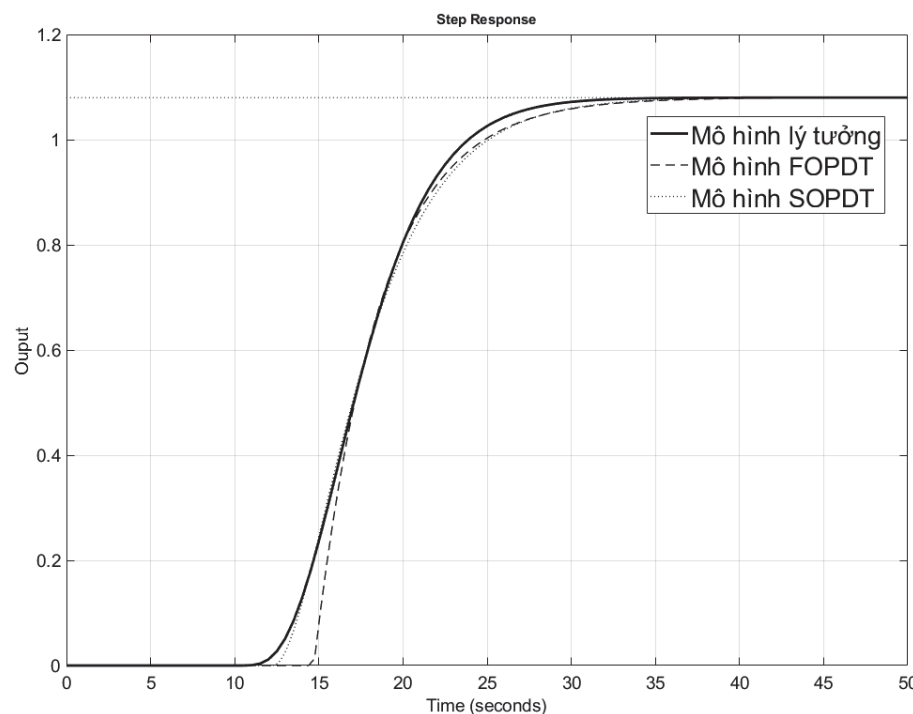
- Mô hình SOPDT: $\hat{G}(s) = \frac{k}{(1+T_1s)(1+T_2s)} e^{-Ls}$
- Phương pháp hai điểm qui chiếu
 - Hệ số khuếch đại tĩnh xác định dựa trên giá trị xác lập
 - Thời gian trễ xác định dựa trên kẻ tiếp tuyến tại điểm uốn (hoặc phân tích số liệu trên máy tính)
 - Chọn hai điểm qui chiếu T_1 và T_2 (ví dụ tương ứng với 33% và 67% giá trị xác lập):

$$1 + \frac{T_2 e^{\frac{t_i-L}{T_2}} - T_1 e^{\frac{t_i-L}{T_1}}}{T_1 - T_2} - \frac{\Delta y(t_i)}{\Delta y_\infty} = 0, \quad i = 1, 2$$

- Giải được bằng phương pháp số, không có gì phức tạp nếu sử dụng các công cụ tính toán như MATLAB (ví dụ hàm fsolve trong Optimization Toolbox)

Ví dụ mô hình SOPDT

- Quá trình có mô hình lý tưởng: $G(s) = \frac{1.08}{(s+1)^2(2s+1)^3} e^{-10s}$
- Mô hình ước lượng:
 $k = 1.08, L = 12.3 [s]$
 $T_1 = 2.9985 [s]$ và $T_2 = 2.9986 [s]$



Mô hình chứa khâu tích phân

- Mô hình hàm truyền:

$$G_{IT1D} = \frac{k}{s(1+Ts)} e^{-Ls} \quad G_{IT2D} = \frac{k}{s(1+T_1s)(1+T_2s)} e^{-Ls}$$

- Có thể đưa về nhận dạng mô hình FOPDT hoặc SOPDT :
 - Sử dụng tín hiệu kích thích dạng xung thay cho tín hiệu bậc thang.
 - Sử dụng tín hiệu kích thích dạng bậc thang, nhưng lấy số liệu là đạo hàm của tín hiệu đầu ra thay cho trực tiếp giá trị đầu ra.
- Nhược điểm: có thể đưa quá trình ra khỏi phạm vi làm việc cho phép.

Nhận dạng dựa trên đáp ứng quá độ



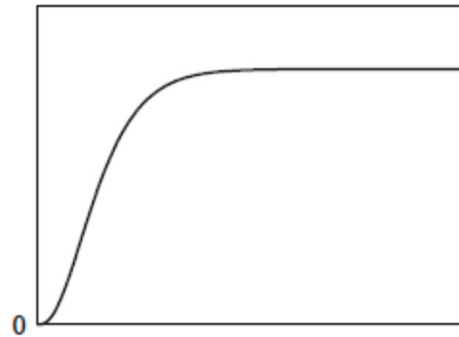
- Một số đường cong đáp ứng quá độ tiêu biểu của các quá trình công nghiệp không có trễ

- FOPDT: first order plus dead-time

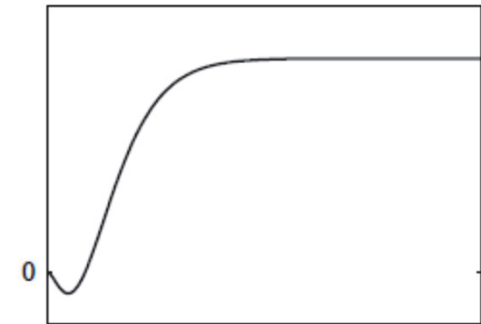
- $\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = ku(t - \theta)$

- SOPDT: second order plus dead-time

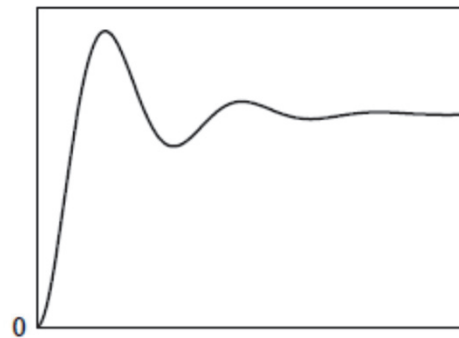
- $\tau^2 \frac{d^2y(t)}{dt^2} + 2\tau\xi \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = ku(t - \theta)$



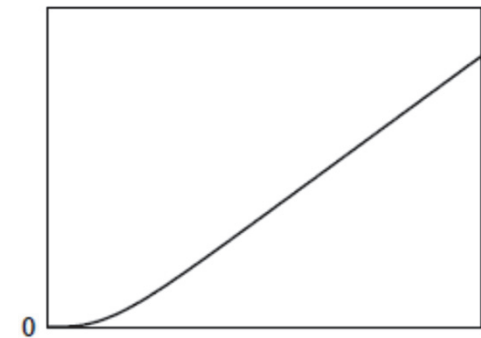
a) Quán tính



b) Quán tính-ngược



c) Dao động tắt dần



d) Quán tính-tích phân

Mô hình hóa thực nghiệm



$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ u \end{pmatrix}$$

...

Nhận dạng hệ thống



- Phương pháp xây dựng mô hình toán học trên cơ sở các số liệu vào-ra thực nghiệm được gọi là mô hình hóa thực nghiệm hay nhận dạng hệ thống (system identification).
- Theo IEC 60050-351: “Nhận dạng hệ thống là những thủ tục suy luận một mô hình toán học biểu diễn đặc tính tĩnh và đặc tính quá độ của một hệ thống từ đáp ứng của nó đối với một tín hiệu đầu vào xác định rõ, ví dụ hàm bậc thang, một xung hoặc nhiễu tạp trắng”.
- Theo Lofti A. Zadeh: Trên cơ sở quan sát số liệu vào/ra thực nghiệm, các định các tham số của mô hình từ một lớp các mô hình thích hợp, sao cho sai số là nhỏ nhất.

Các yếu tố cơ bản của nhận dạng



- Số liệu vào/ra thực nghiệm:
 - Xác định như thế nào? Trong điều kiện nào?
 - Dạng nhiễu (nhiều quá trình, nhiễu đo), độ lớn của nhiễu?
- Dạng mô hình, cấu trúc mô hình
 - Mô hình phi tuyến/tuyến tính, liên tục/gián đoạn hàm truyền đạt/không gian trạng thái, ...
 - Bậc mô hình, thời gian trễ
- Chỉ tiêu đánh giá chất lượng mô hình
 - Mô phỏng và so sánh với số liệu đo như thế nào?
- Thuật toán xác định tham số
 - Rất đa dạng → thuật toán nào phù hợp với bài toán nào?

Các bước tiến hành



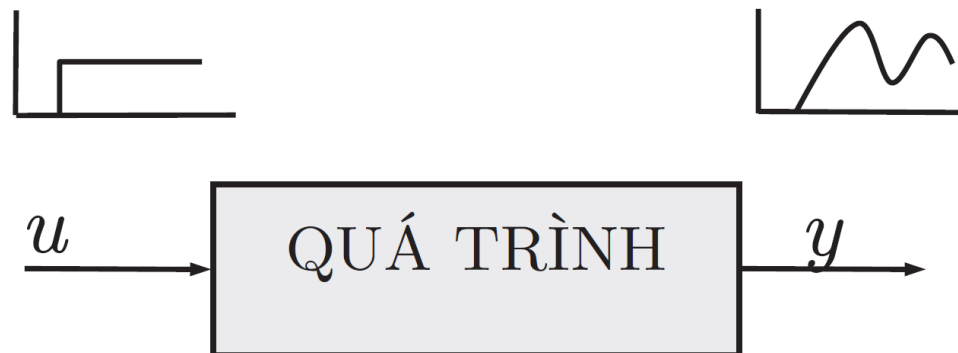
1. Thu thập, khai thác thông tin ban đầu về quá trình (“apriori” information)
2. Lựa chọn phương pháp nhận dạng (trực tuyến/ ngoại tuyến, vòng hở/vòng kín, chủ động/bị động, thuật toán nhận dạng, ...).
3. Lấy số liệu thực nghiệm cho từng cặp biến vào/ra, xử lý thô các số liệu nhằm loại bỏ những giá trị đo kém tin cậy.
4. Quyết định về dạng mô hình và giả thiết ban đầu về cấu trúc mô hình
5. Lựa chọn thuật toán và xác định các tham số mô hình
6. Mô phỏng, kiểm chứng và đánh giá mô hình
7. Quay lại một trong các bước 1-4 nếu cần

Phân loại các phương pháp nhận dạng

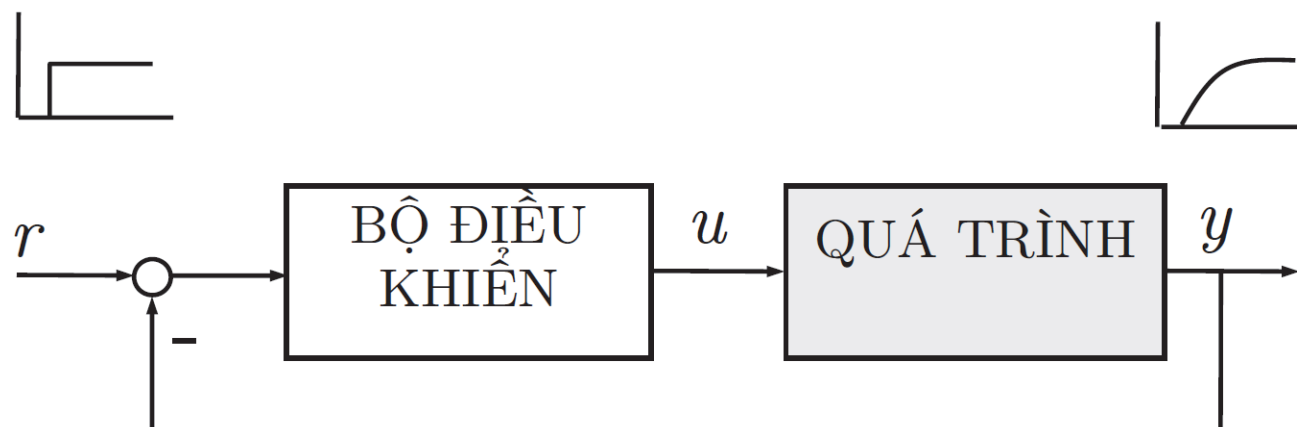


- Theo dạng mô hình sử dụng: phi tuyến/tuyến tính, liên tục/gián đoạn, mô hình thời gian/tần số
- Theo dạng số liệu thực nghiệm: chủ động/bị động
- Theo mục đích sử dụng mô hình: trực tuyến, ngoại tuyến
- Theo thuật toán ước lượng mô hình:
 - bình phương tối thiểu (least squares, LS),
 - phân tích tương quan (correlation analysis), phân tích phổ (spectrum analysis),
 - phương pháp lỗi dự báo (prediction error method, PEM)
 - phương pháp không gian con (subspace method).
- Nhận dạng vòng hở/vòng kín

Nhận dạng vòng hở/vòng kín



(a) Nhận dạng vòng hở



(b) Nhận dạng vòng kín

Đánh giá và kiểm chứng mô hình

- Tốt nhất: Bộ số liệu phục vụ kiểm chứng khác bộ số liệu phục vụ ước lượng mô hình
- Đánh giá trên miền thời gian:

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y(kh) - \hat{y}(kh)]^2$$

- h là chu kỳ trích mẫu tín hiệu (chu kỳ thu thập số liệu)
- k là bước trích mẫu tín hiệu (bước thu thập số liệu)
- y là giá trị đầu ra đo được thực nghiệm
- \hat{y} là giá trị đầu ra dự báo trên mô hình

- Đánh giá trên miền tần số

$$E = \max_{\omega \in \mathcal{O}} \left\{ \left| \frac{\hat{G}(j\omega) - G(j\omega)}{G(j\omega)} \right| \times 100\% \right\}$$

Lựa chọn phương pháp nhận dạng



- Quá trình cho phép nhận dạng chủ động và đối tượng có thể xấp xỉ về mô hình FOPDT (hoặc có thể có thêm thành phần tích phân):
 - Phương pháp hai điểm qui chiếu theo đơn giản và dễ áp dụng trực quan nhất,
 - Nếu có nhiều đo và thuật toán được thực hiện trên máy tính thì phương pháp diện tích cho kết quả chính xác hơn.
- Quá trình cho phép nhận dạng chủ động và phương pháp thiết kế điều khiển sử dụng trực tiếp mô hình gián đoạn:
 - Nên chọn các phương pháp ước lượng dựa trên nguyên lý bình phương tối thiểu áp dụng cho mô hình phù hợp với bài toán điều khiển (FIR, ARX, ARMAX,...).

Lựa chọn phương pháp nhận dạng



- Quá trình không cho phép nhận dạng chủ động vòng hở:
 - Phương pháp nhận dạng dựa trên phản hồi rơ-le và các phiên bản cải tiến tỏ ra tương đối đa năng và đặc biệt phù hợp cho thiết kế điều khiển trên miền tần số.
 - Nếu chất lượng mô hình cần cao hơn thì nên áp dụng các phương pháp bình phương tối thiểu.
- Quá trình hoàn toàn không cho phép nhận dạng chủ động:
 - Nếu phương pháp thiết kế điều khiển sử dụng trực tiếp mô hình gián đoạn thì các phương pháp bình phương tối thiểu là phù hợp nhất.
 - Chỉ nên sử dụng phương pháp phân tích phổ tín hiệu khi phương pháp thiết kế điều khiển hoàn toàn trên đặc tính tần số.