

Điều khiển quá trình

Chương 5: Phân tích hệ điều khiển phản hồi

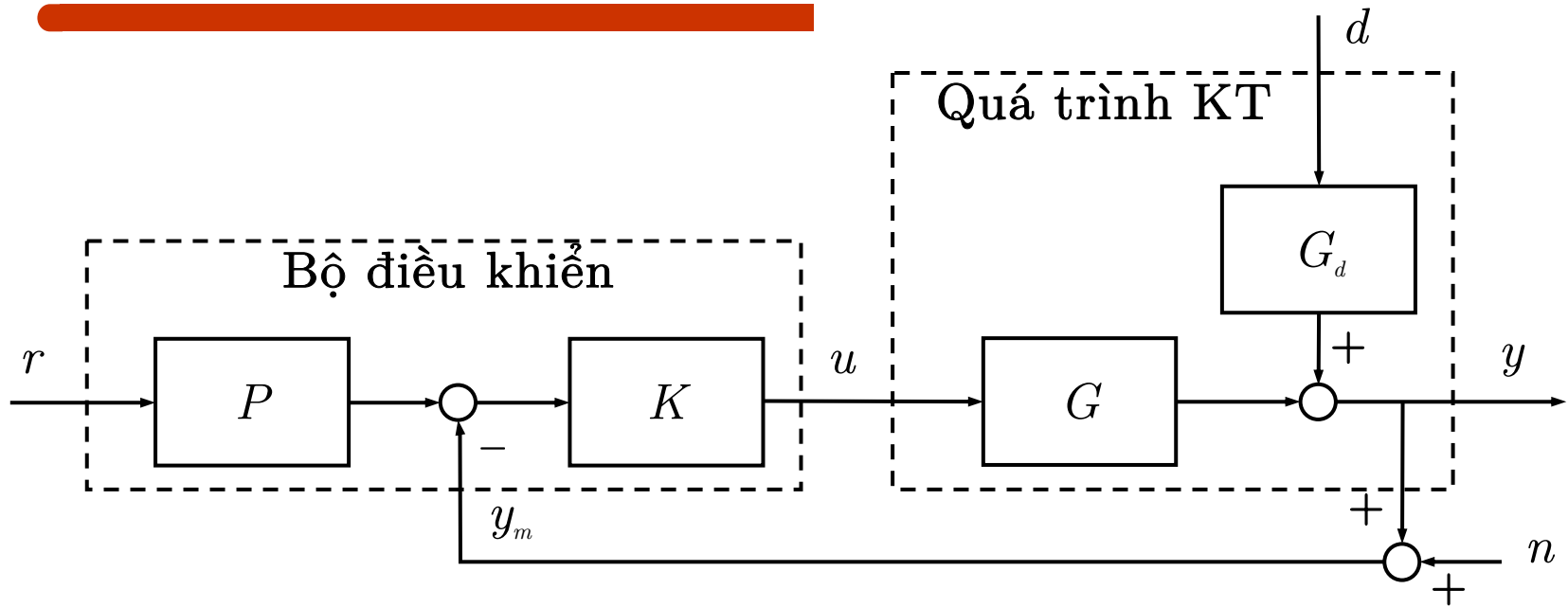
Nội dung chương 5

- 5.1 Cấu hình chuẩn của hệ điều khiển phản hồi
- 5.2 Chuẩn hóa mô hình
- 5.3 Phát biểu bài toán chuẩn
- 5.4 Đánh giá chất lượng trên miền thời gian
- 5.5 Đánh giá chất lượng trên miền tần số

Mục đích bài giảng

- Làm rõ các yếu tố liên quan tới chất lượng của một hệ thống điều khiển phản hồi
- Những nguyên tắc cơ bản nhất trong thiết kế một bộ điều khiển phản hồi

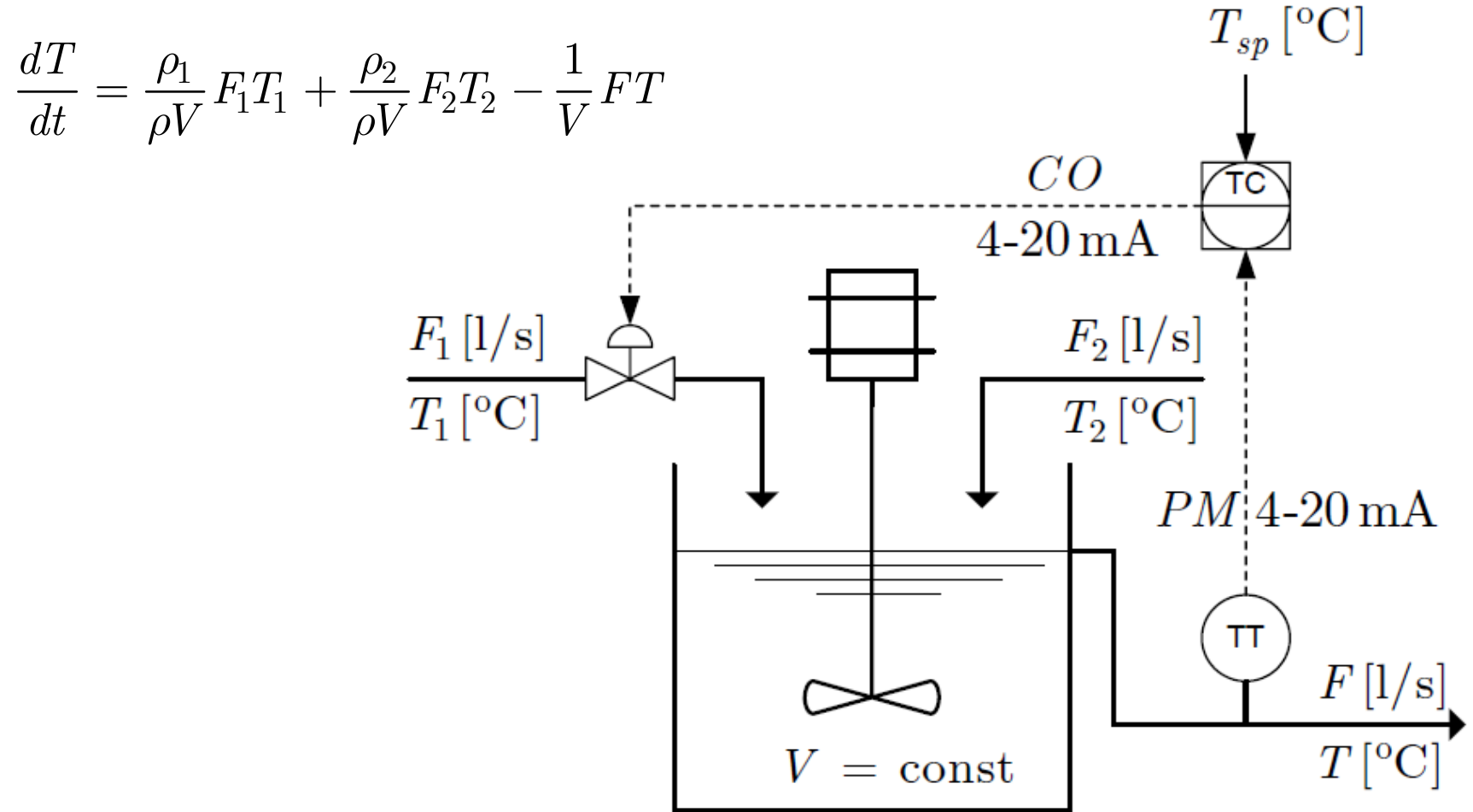
5.1 Cấu hình chuẩn

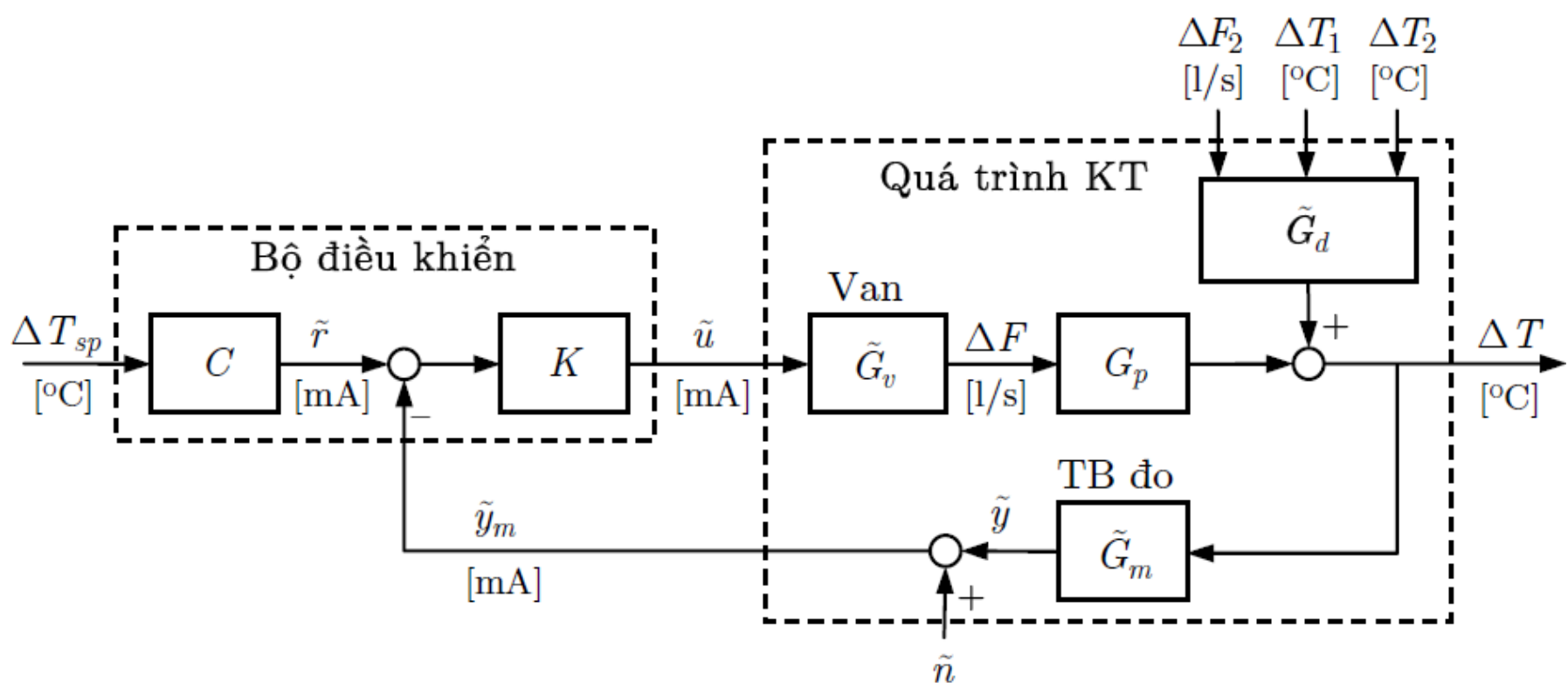


r tín hiệu đặt, giá trị đặt
 u tín hiệu điều khiển
 y tín hiệu ra được điều khiển
 y_m tín hiệu đo, tín hiệu phản hồi
 d nhiễu quá trình (không được đo)
 n nhiễu đo

G mô hình đối tượng
 G_d mô hình nhiễu
 K khâu điều chỉnh
 P khâu lọc trước

Ví dụ hệ thống điều khiển nhiệt độ





\tilde{G}_v hàm truyền đạt của van điều khiển
 G_p hàm truyền đạt của quá trình nhiệt
 \tilde{G}_m hàm truyền đạt thiết bị đo
 \tilde{G}_d ma trận hàm truyền đạt nhiễu
 C khâu tạo tín hiệu đặt
 K khâu điều chỉnh
 CO tín hiệu ra thực của bộ điều khiển
 PM tín hiệu đo và phản hồi thực

\tilde{r} tín hiệu đặt
 \tilde{y} tín hiệu ra được điều khiển
 \tilde{u} tín hiệu điều khiển (chênh lệch)
 $\tilde{u} = CO - \overline{CO}$
 \tilde{y}_m tín hiệu phản hồi (chênh lệch)
 $\tilde{y} = PM - \overline{PM}$
 \tilde{n} nhiễu đo

- Mô hình tuyến tính hóa tại điểm làm việc

$$\Delta T(s) = G_p(s)\Delta F_1(s) + \tilde{G}_d(s) \begin{bmatrix} \Delta F_2(s) \\ \Delta T_1(s) \\ \Delta T_2(s) \end{bmatrix}$$

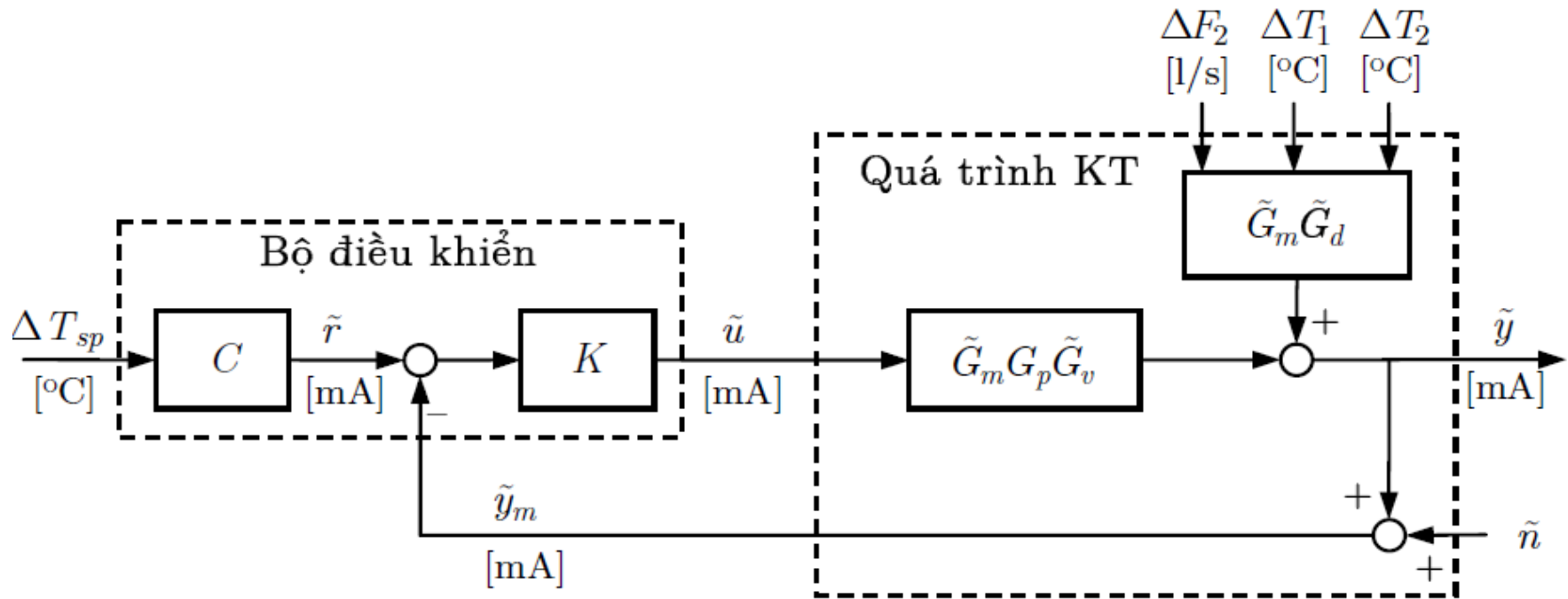
$$G_p(s) = \frac{k_p}{1 + \tau s}, \quad \tilde{G}_d(s) = \frac{1}{1 + \tau s} [k_{d1} \quad k_{d2} \quad k_{d3}]$$

$$\tau = \frac{V}{\bar{F}}, \quad k_p = \frac{\rho_1 \bar{T}_1 - \rho \bar{T}}{\rho \bar{F}}, \quad k_{d1} = \frac{\rho_2 \bar{T}_2 - \rho \bar{T}}{\rho \bar{F}}, \quad k_{d2} = \frac{\rho_1 \bar{F}_1}{\rho \bar{F}}, \quad k_{d3} = \frac{\rho_2 \bar{F}_2}{\rho \bar{F}}$$

- Mô hình van điều khiển và thiết bị đo

$$\tilde{G}_v(s) = \frac{\tilde{k}_v}{\tau_v s + 1} \qquad \tilde{G}_m(s) = \frac{\tilde{k}_m}{\tau_m s + 1}$$

Cấu trúc đơn giản hóa hệ ĐK nhiệt độ



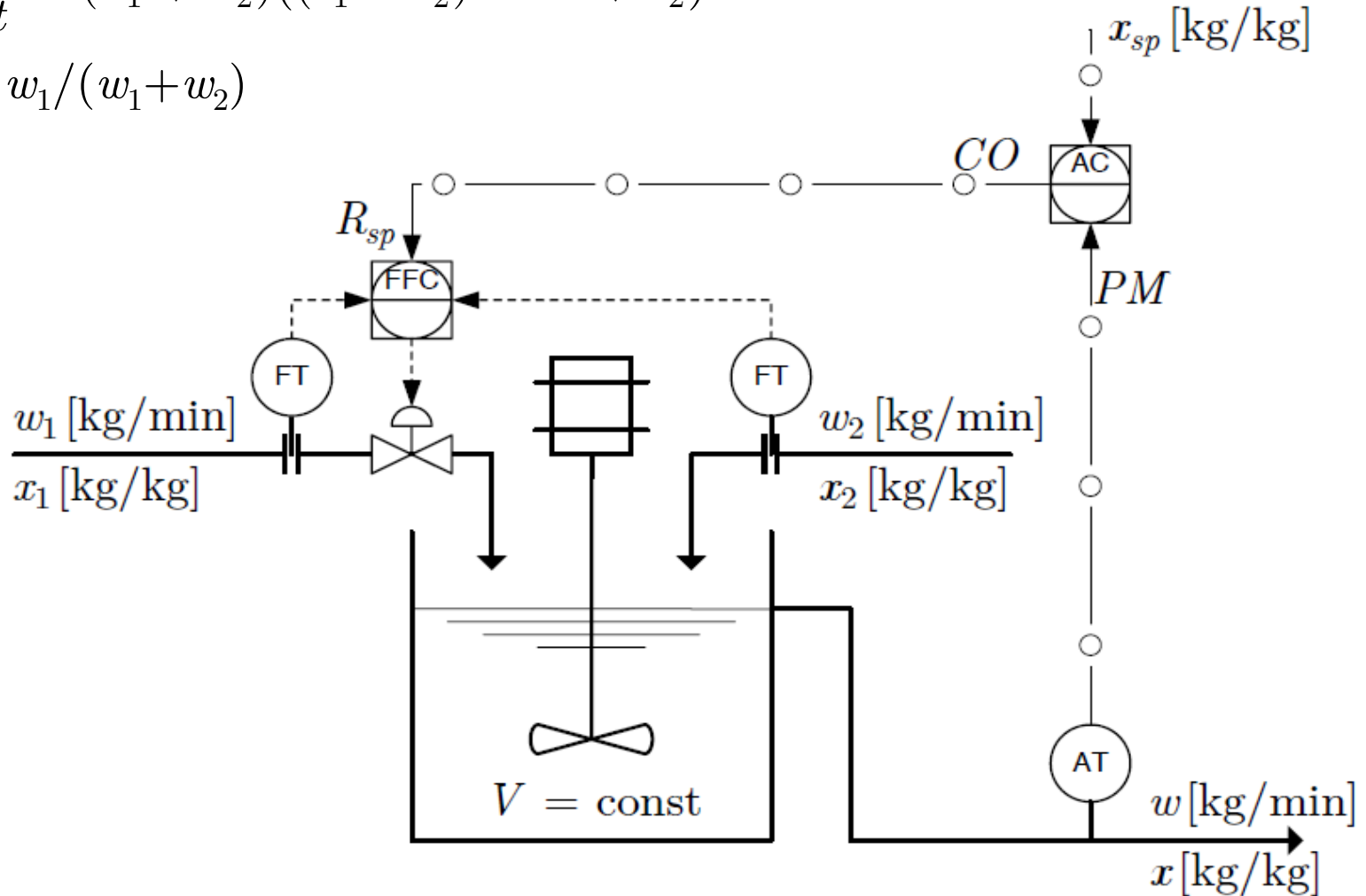
C cần được chọn sao cho có đặc tính gần giống với \tilde{G}_m , ít ra là ở hệ số khuếch đại tĩnh.

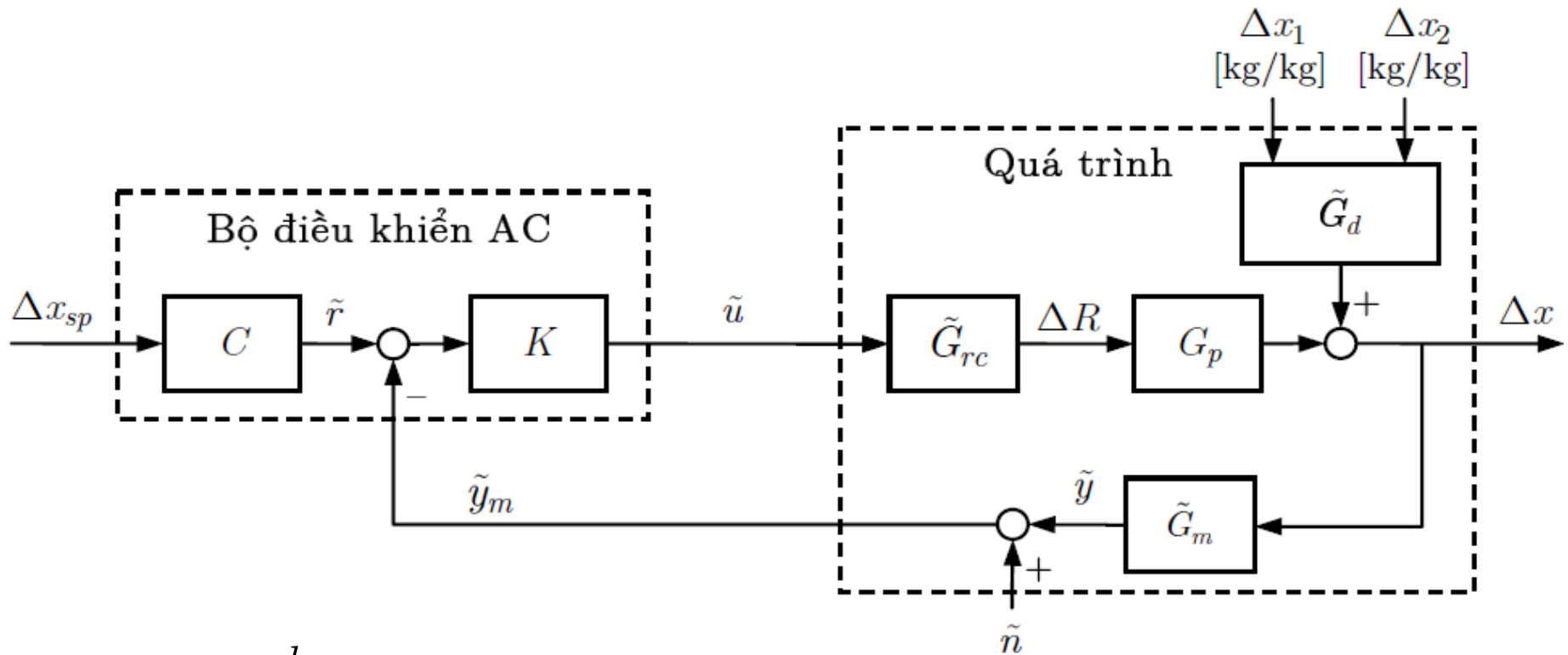
Trong thực tế ta có thể chọn $C = \tilde{G}_m$ hoặc $C = \tilde{k}_m$.

Ví dụ hệ thống điều khiển thành phần

$$\rho A h \frac{dx}{dt} = (w_1 + w_2)((x_1 - x_2)R - x + x_2)$$

$$R = w_1 / (w_1 + w_2)$$



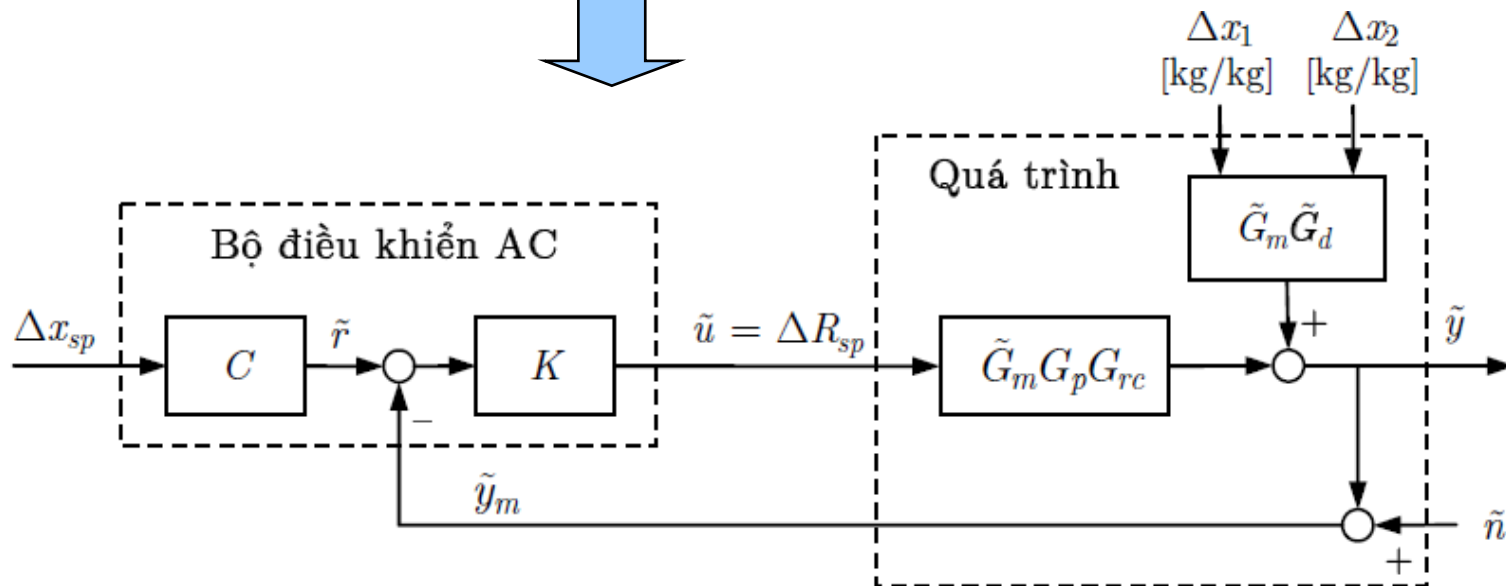
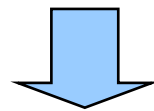
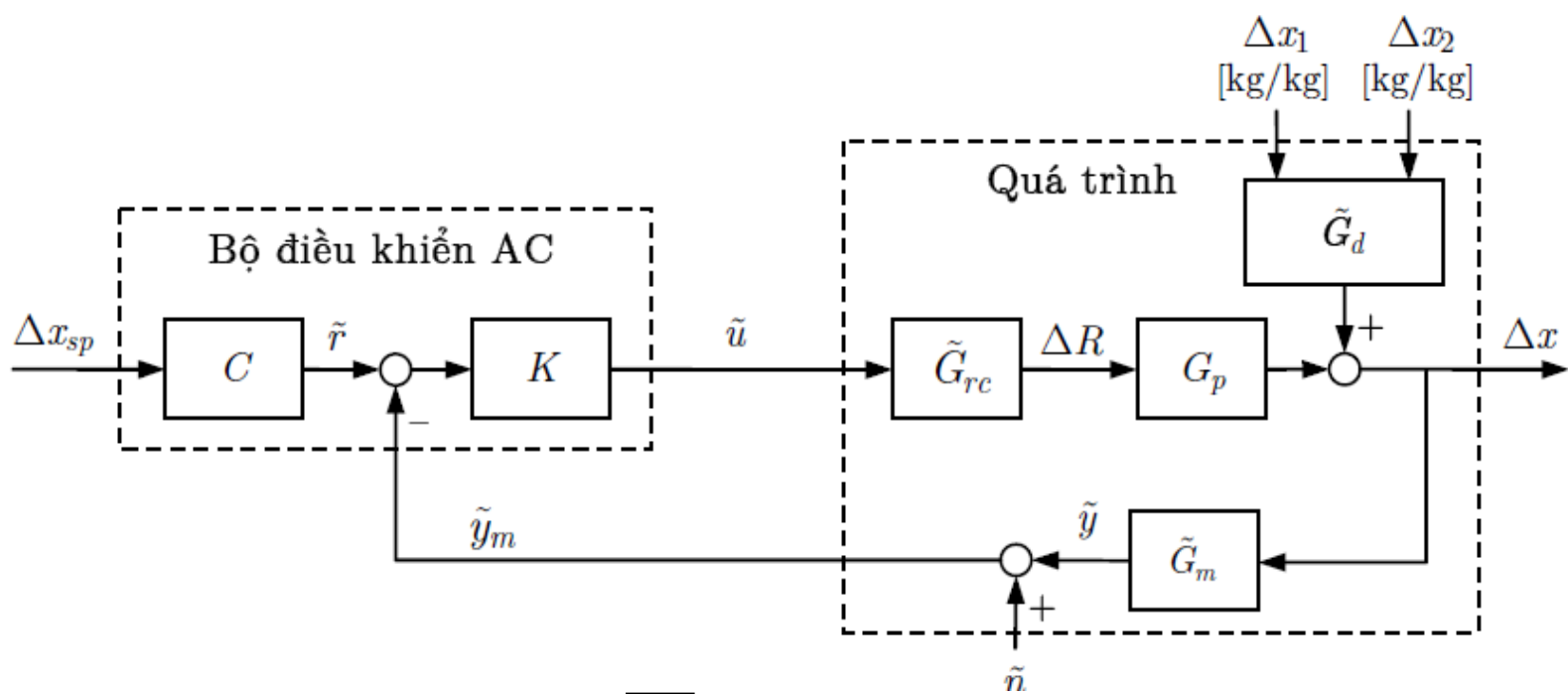


$$\rho A h \frac{dx}{dt} = (w_1 + w_2)((x_1 - x_2)R - x + x_2)$$

Tuyến tính hóa xung quanh điểm làm việc

$$\frac{\rho V}{\bar{w}} \frac{d\Delta x}{dt} + \Delta x = (\bar{x}_1 - \bar{x}_2)\Delta R + \bar{R}\Delta x_1 + (1 - \bar{R})\Delta x_2$$

$$G_p(s) = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\tau s + 1}, \quad \tilde{G}_d = \frac{1}{\tau s + 1} \begin{bmatrix} \bar{R} & 1 - \bar{R} \end{bmatrix} \quad \tau = \rho V / \bar{w}$$



5.2 Chuẩn hóa mô hình

- Mô hình ban đầu của quá trình chưa được chuẩn hóa:

$$\tilde{y}(s) = \tilde{G}_m(s)G_p(s)\tilde{G}_v(s)\tilde{u}(s) + \tilde{G}_m(s)\tilde{G}_d(s)\tilde{d}(s)$$

- Chuẩn hóa tín hiệu:

$$y = \tilde{y} / S_y, \quad u = \tilde{u} / S_u, \quad d = \tilde{d} / S_d$$

S_y là *dải tín hiệu đo*, S_u là *dải tín hiệu điều khiển* và S_d là *dải nhiễu quá trình*

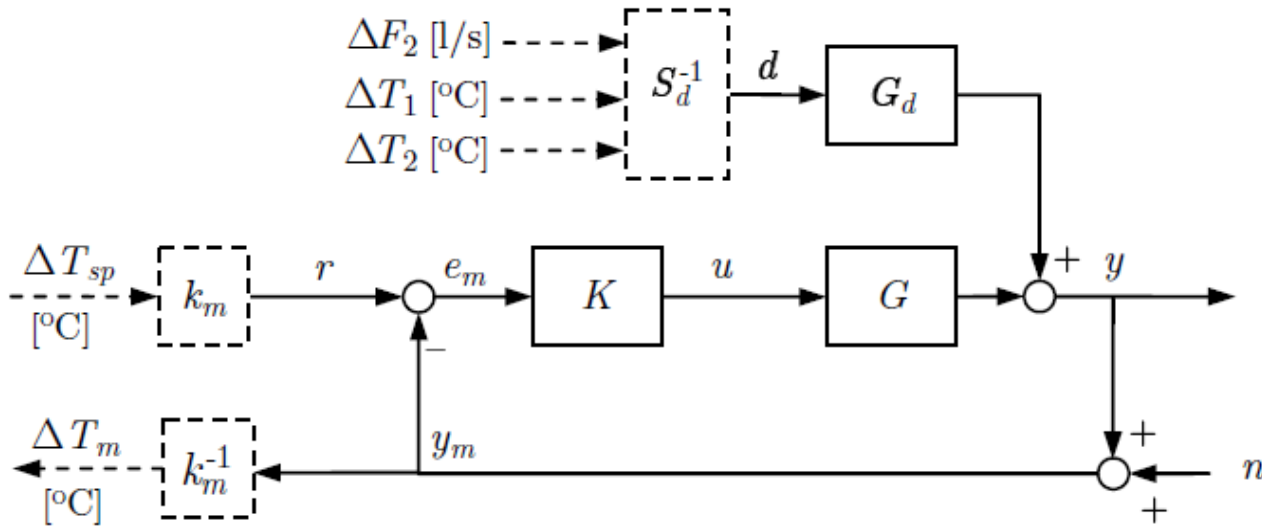
- Mô hình chuẩn hóa

$$y(s) = G(s)u(s) + G_d(s)d(s)$$

$$G(s) = \frac{\tilde{G}_m(s)}{S_y} G_p(s) S_u \tilde{G}_v(s) = G_m(s) G_p(s) G_v(s)$$

$$G_d(s) = \frac{\tilde{G}_m(s)}{S_y} S_d \tilde{G}_d(s) = G_m(s) S_d \tilde{G}_d(s)$$

Ví dụ hệ thống điều khiển nhiệt độ



$$S_y = S_u = 16 \text{ mA} \quad S_d = \begin{bmatrix} \Delta F_{2,\max} & 0 & 0 \\ 0 & \Delta T_{1,\max} & 0 \\ 0 & 0 & \Delta T_{2,\max} \end{bmatrix}$$

$$G_d = \frac{k_m}{1 + \tau_m s} S_d \tilde{G}_d = \frac{k_m}{(1 + \tau_m s)(1 + \tau s)} \begin{bmatrix} k_{d1} \Delta F_{2,\max} & k_{d2} \Delta T_{1,\max} & k_{d3} \Delta T_{2,\max} \end{bmatrix}$$

$$r = \frac{\tilde{r}}{S_y} = \frac{C \Delta T_{sp}}{S_y} = \frac{\tilde{k}_m}{S_y} \Delta T_{sp} = k_m \Delta T_{sp} \quad \Delta T_m = \frac{\tilde{y}_m}{\tilde{k}_m} = \frac{S_y y_m}{\tilde{k}_m} = \frac{y_m}{S_y^{-1} \tilde{k}_m} = \frac{y_m}{k_m}$$

5.3 Phát biểu bài toán chuẩn

Cho trước các mô hình G và G_d , xác định khâu điều chỉnh K và khâu lọc trước P sao cho:

1. Hệ thống hoạt động ổn định, đảm bảo các điều kiện vận hành theo yêu cầu của quy trình công nghệ,
2. Chất lượng và tốc độ đáp ứng của đầu ra y với giá trị đặt r và nhiễu quá trình d được cải thiện, sai lệch điều khiển $e = r - y$ nhanh chóng được triệt tiêu hoặc ít ra là nằm trong phạm vi cho phép, và
3. Tín hiệu điều khiển u có giá trị nhỏ, thay đổi chậm và trơn tru (nhằm tiết kiệm chi phí năng lượng và tăng tuổi thọ cho thiết bị chấp hành)
trong điều kiện tồn tại nhiễu đo n , sai lệch mô hình và giới hạn vật lý của quá trình (giới hạn tín hiệu điều khiển, khả năng đáp ứng của quá trình).

Các quan hệ cơ bản

Hàm truyền đạt hệ hở:

$$L = GK$$

Hàm truyền đạt hệ kín:

$$T = SL = \frac{GK}{1 + GK} = \frac{L}{1 + L}$$

Hàm nhạy:

$$S = \frac{1}{1 + GK} = \frac{1}{1 + L}$$

Chênh lệch hồi tiếp:

$$F = 1 + GK$$

Đáp ứng hệ kín

$$y = TPr + SG_d d - Tn$$

$$e = (1 - TP)r - SG_d d + Tn$$

$$u = KS(Pr - G_d d - n)$$

Yêu cầu chất lượng điều khiển

- Tính ổn định: mục tiêu duy trì điểm làm việc, bảo đảm vận hành hệ thống trơn tru và an toàn
- Tốc độ và chất lượng đáp ứng: Khả năng bám giá trị biến chủ đạo, khả năng kháng nhiễu, nhằm mục tiêu đảm bảo năng suất, chất lượng sản phẩm và các điều kiện vận hành
- Tính bền vững: Tính ổn định và chất lượng được đảm bảo với sai lệch mô hình, đặc tính quá trình thay đổi và với tác động của nhiễu đo
- Diễn biến trơn tru và ít thay đổi của biến điều khiển, nhằm mục tiêu tiết kiệm chi phí năng lượng và tăng tuổi thọ cho thiết bị chấp hành.

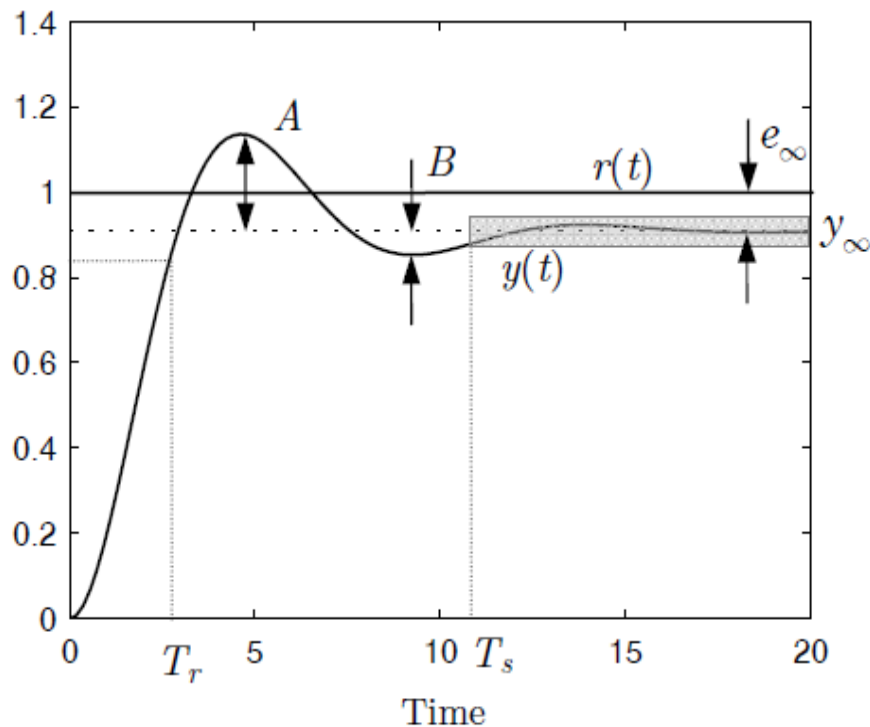
Các yêu cầu cần thỏa hiệp

- Tốc độ đáp ứng và chất lượng đáp ứng
- Đặc tính bám giá trị đặt/loại bỏ nhiễu quá trình và tính bền vững với nhiễu đo
- Đáp ứng đầu ra và đáp ứng tín hiệu điều khiển
- Chất lượng điều khiển tối ưu và tính bền vững với sai lệch mô hình

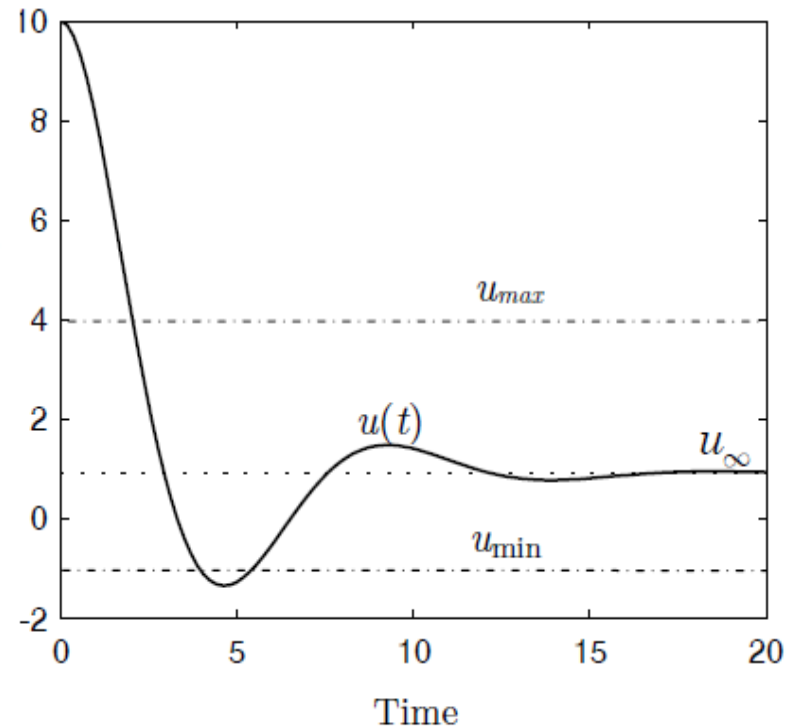
5.4 Đánh giá chất lượng trên miền thời gian

- Đánh giá thông qua phân tích hoặc thông qua mô phỏng
- Đánh giá bằng phương pháp đại số hoặc phương pháp đồ thị
- Đánh giá dựa trên từng chỉ tiêu riêng rẽ hoặc dựa trên chỉ tiêu tổng hợp

Đáp ứng với thay đổi giá trị đặt



(a) Đáp ứng đầu ra



(b) Đáp ứng tín hiệu điều khiển

Các chỉ tiêu chất lượng trên miền thời gian

- *Thời gian đáp ứng (response time, T_r):* Thời gian cần cho đầu ra lần đầu tiên đạt được 90% giá trị cuối cùng. Thời gian đáp ứng càng nhỏ càng tốt.
- *Thời gian quá độ (settling time, T_s):* Sau thời gian này đầu ra $y(t)$ nằm lại trong phạm vi sai lệch cho phép so với giá trị xác lập (thông thường $\pm 5\%$ hoặc $\pm 2\%$ tùy theo yêu cầu). Thời gian quá độ càng nhỏ càng tốt.
- *Độ quá điều chỉnh (overshoot):* Chênh lệch giữa giá trị đỉnh và giá trị xác lập (A) chia cho giá trị đầu ra xác lập. Thông thường, độ quá điều chỉnh được quy định không được phép vượt quá 20%-25%.
- *Hệ số tắt dần (decay ratio):* Tỉ số giữa đỉnh thứ hai và đỉnh thứ nhất (so với giá trị xác lập), tức B/A . Hệ số tắt dần yêu cầu thường không lớn hơn 0.3.
- *Sai lệch tĩnh (steady state error, e):* Sai lệch giữa giá trị xác lập của đầu ra so với giá trị đặt ($e = r - y$). Sai lệch tĩnh càng nhỏ càng tốt, thông thường chỉ yêu cầu nằm trong một giới hạn nào đó.

Tiêu chuẩn tích phân (chuẩn tín hiệu)

- Tích phân bình phương sai lệch (*Integral Squared Error, ISE*)

$$\|e(t)\|_2 = \left(\int_0^\infty |e(\tau)|^2 d\tau \right)^{1/2}$$

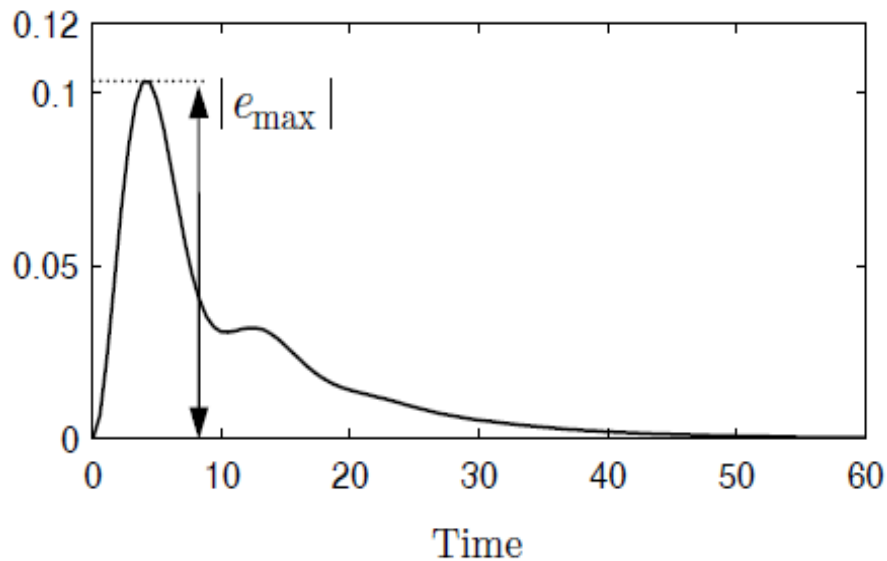
- Tích phân sai lệch tuyệt đối (*Integral Absolute Error, IAE*)

$$\|e(t)\|_1 = \int_0^\infty |e(\tau)| d\tau$$

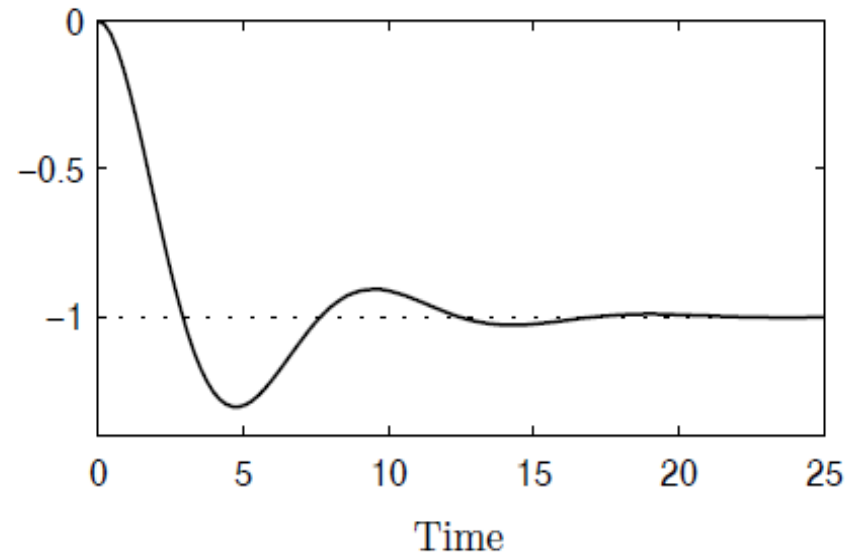
- Mở rộng để quan tâm tới diễn biến của biến điều khiển:

$$J = \left(\int_0^\infty |e(\tau)|^2 d\tau \right)^{1/2} + \lambda \left(\int_0^\infty |\Delta u(\tau)|^2 d\tau \right)^{1/2}$$

Đáp ứng quá độ với nhiễu quá trình



(a) Đáp ứng đầu ra

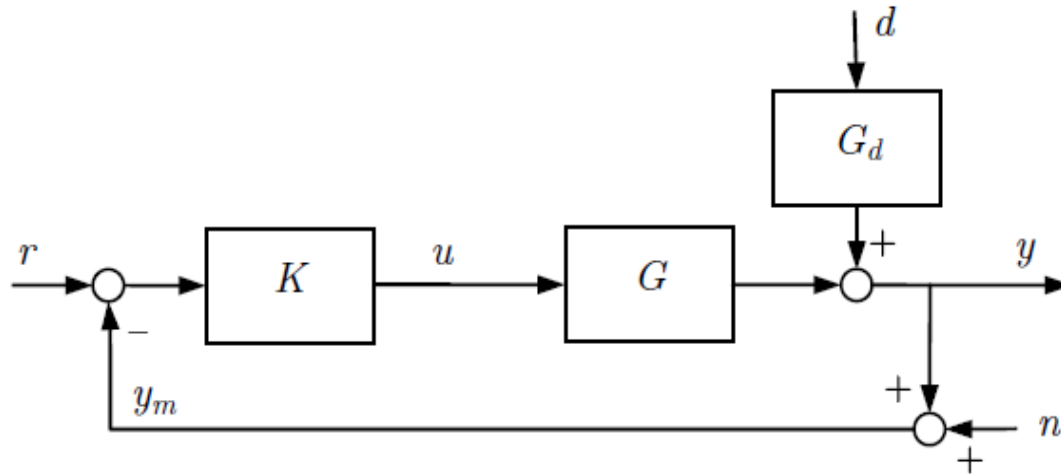


(b) Đáp ứng tín hiệu điều khiển

5.5 Đánh giá chất lượng trên miền tần số

- Đặc tính bám tiệm cận - Thuyết mô hình nội
- Dải thông và tần số cắt
- Độ dự trữ biên-pha

Đặc tính bám tiệm cận



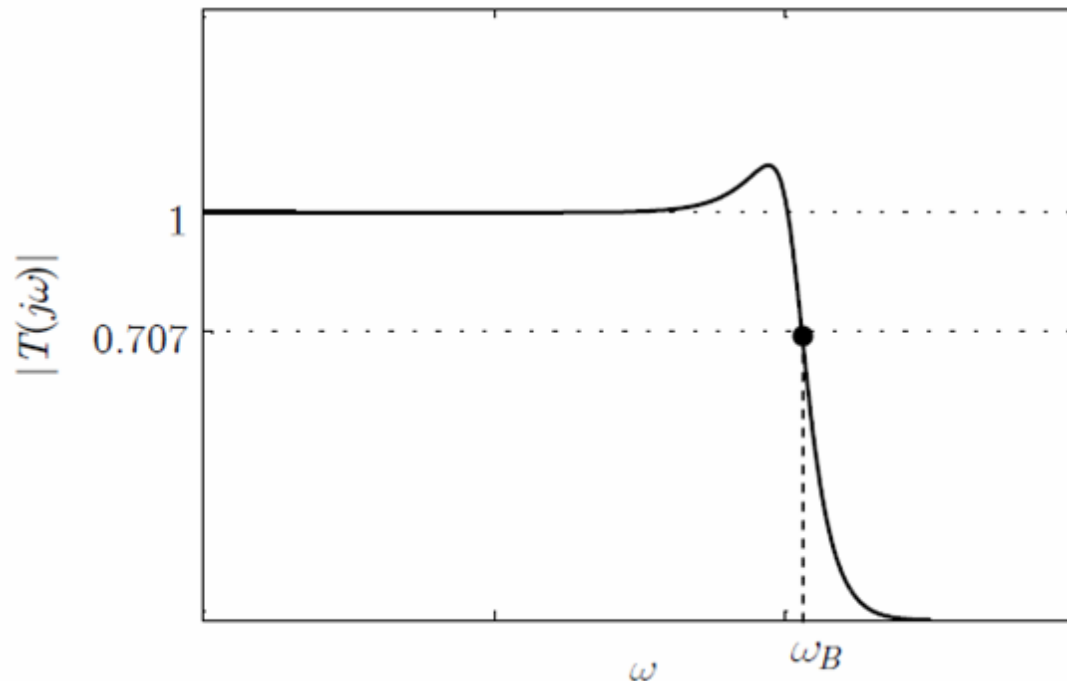
Điều kiện bám tiệm cận: Giả thiết hệ ổn định nội và $d = n = 0$.

- Nếu r thay đổi dạng bậc thang thì sai lệch điều khiển tiến tới không (khi cho) khi và chỉ khi $S(s)$ có ít nhất một điểm không tại gốc tọa độ, hoặc $L(s)$ có ít nhất một điểm cực tại gốc tọa độ.
- Nếu r thay đổi dạng tín hiệu dốc thì sai lệch điều khiển tiến tới không (khi cho) khi và chỉ khi $S(s)$ có ít nhất hai điểm không tại gốc tọa độ, hoặc $L(s)$ có ít nhất hai điểm cực tại gốc tọa độ.

Nguyên lý mô hình nội

Để hệ kín có đặc tính bám tiệm cận thì hàm truyền hệ hở $L(s)$ phải chứa bên trong một mô hình nội của các điểm cực không ổn định của tín hiệu đặt.

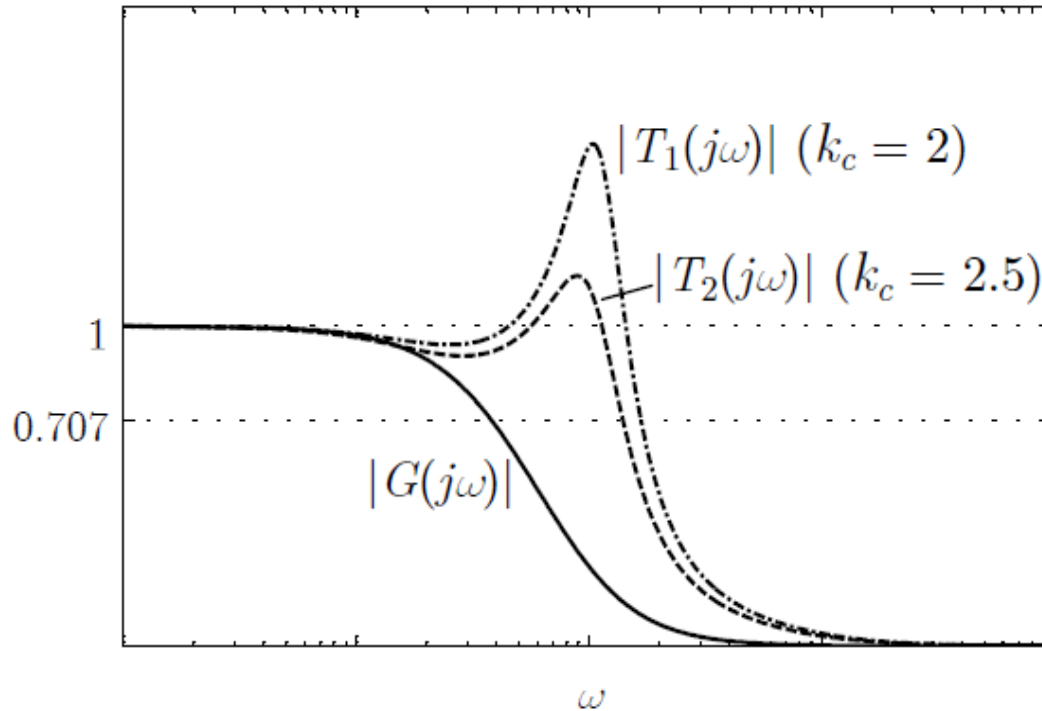
Dải thông của hệ kín



Dải thông: Phạm vi tần số của một tín hiệu đầu vào mà hệ thống “cho qua” với một hệ số khuếch đại (hay nói cách khác là biên độ của đặc tính tần) lớn hơn hoặc bằng $1/\sqrt{2} \approx 0.707$

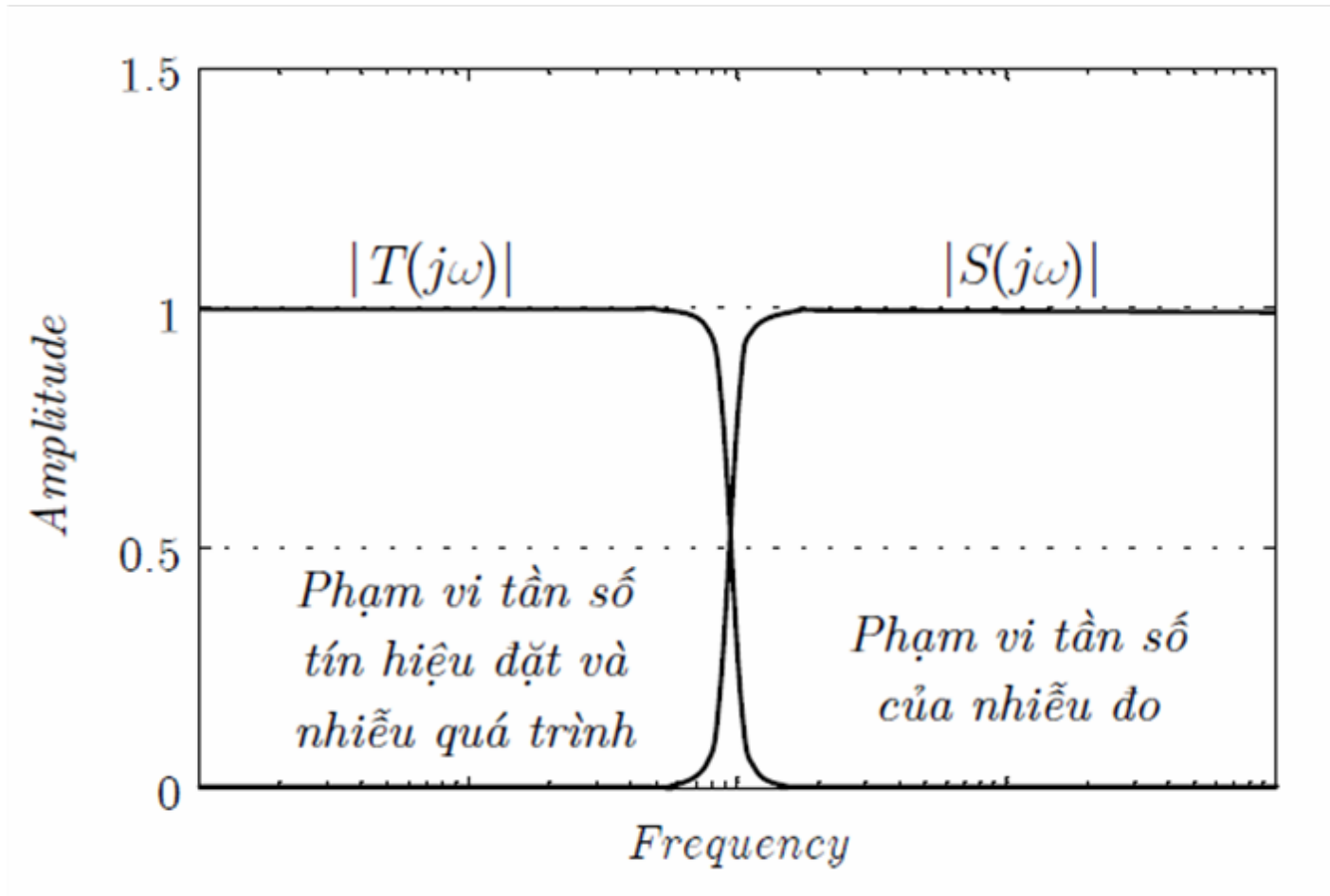
Dải thông phản ánh đặc tính đáp ứng với giá trị đặt, nhiễu quá trình và nhiễu đo

Vai trò của bộ điều khiển phản hồi?

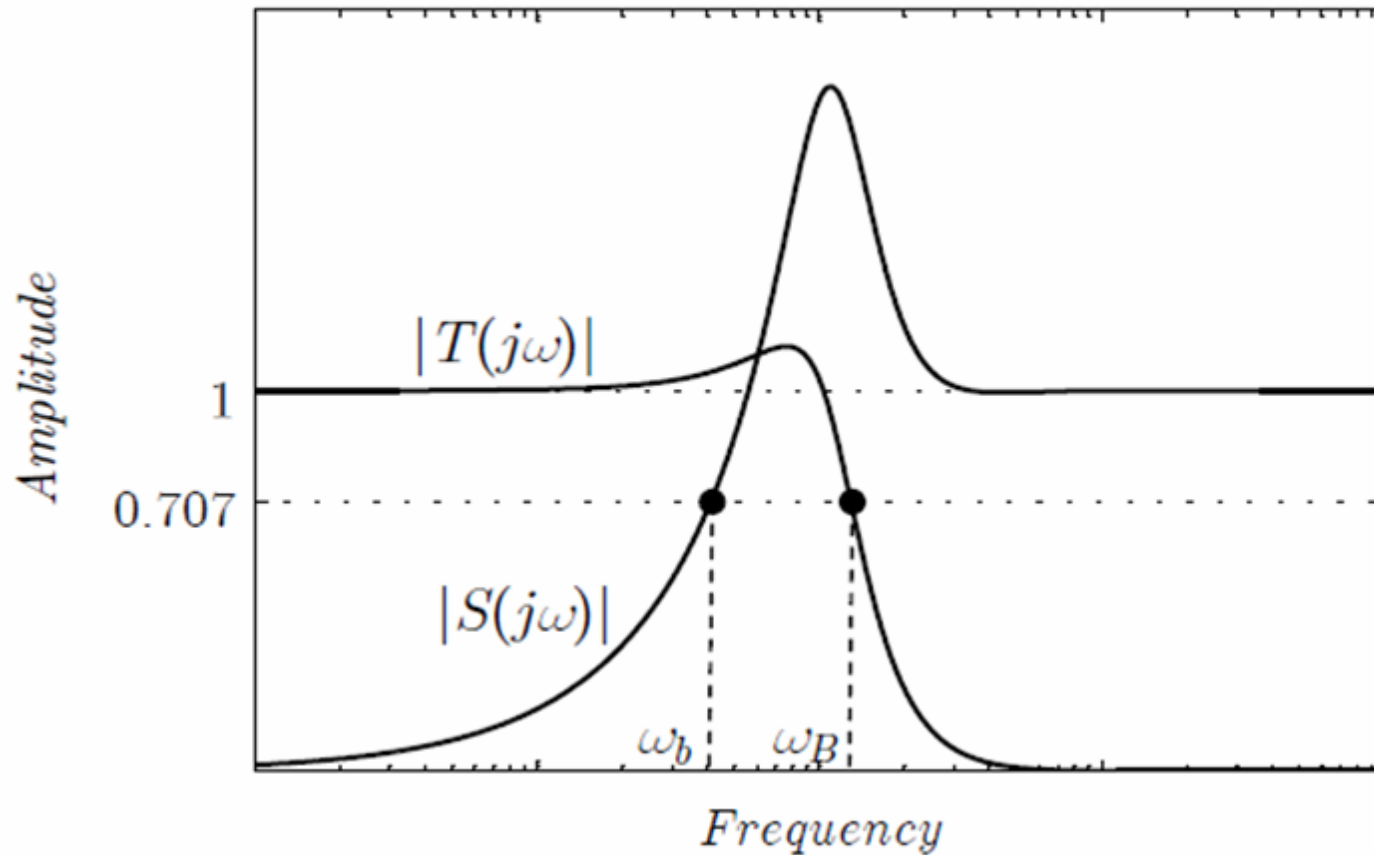


Có thể mở rộng dải thông một cách tùy ý?

Đặc tính biên độ lý tưởng của T và S

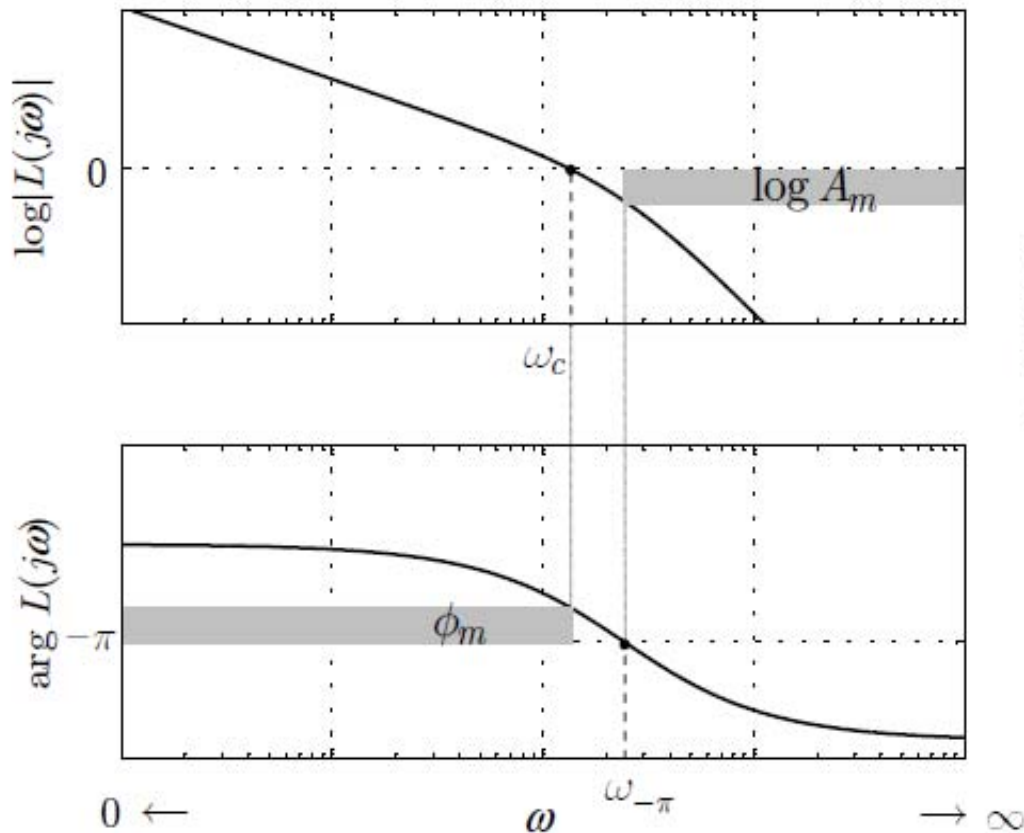


Hai định nghĩa về dải thông hệ kín

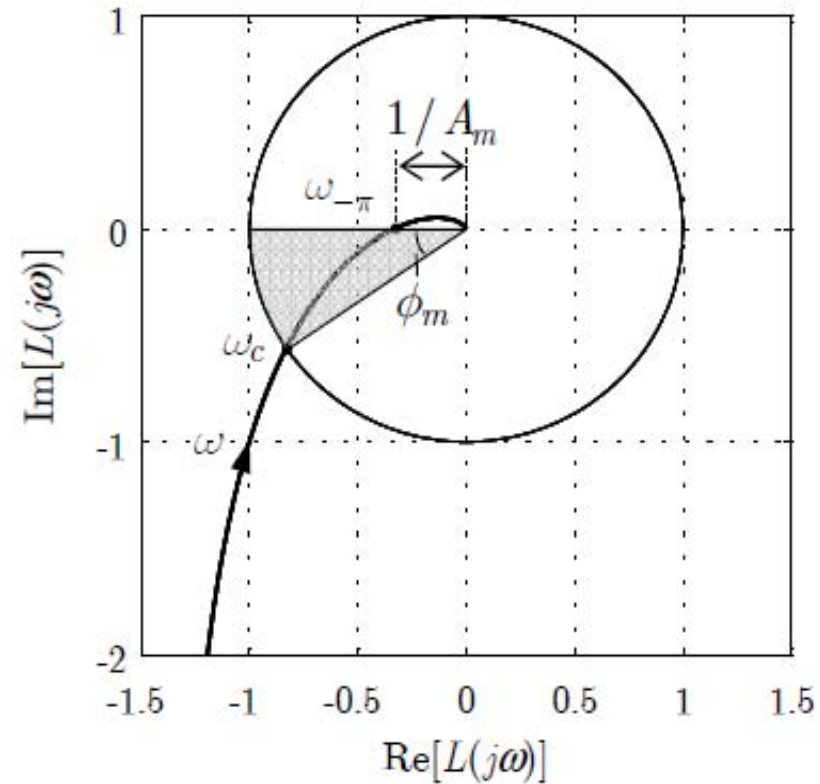


Đặc tính tần hệ hở

$$L(s) = G(s)K(s)$$



a) Đồ thị Bode



b) Đồ thị Nyquist

- Tần số cắt ω_c (*crossover frequency*):
 - Tần số nhỏ nhất mà $|L(j\omega_c)| = 1$
 - Ý nghĩa gần tương đương với dải tần
- Độ dự trữ biên độ A_m , thông thường yêu cầu > 2

$$A_m = \frac{1}{|L(j\omega_{-180})|}$$

- Ý nghĩa: Hệ số tăng lên cho phép của hệ số khuếch đại của quá trình mà vẫn bảo đảm tính ổn định hệ kín
- Độ dự trữ pha ϕ_m , thông thường yêu cầu $\phi_m > 30^\circ$

$$\phi_m = 180^\circ + \arg L(j\omega_c)$$

- Ý nghĩa: Cho phép độ lệch pha của quá trình tăng lên φ_R (ví dụ do bất định về thời gian trễ) mà vẫn đảm bảo tính ổn định hệ kín
 - Độ dự trữ pha còn phản ánh chất lượng đáp ứng của hệ kín, ví dụ với quá trình là khâu FOPDT và bộ điều khiển có thành phần I thì $\phi_m[^\circ] + \text{độ quá điều chỉnh } [\%] \sim 70$