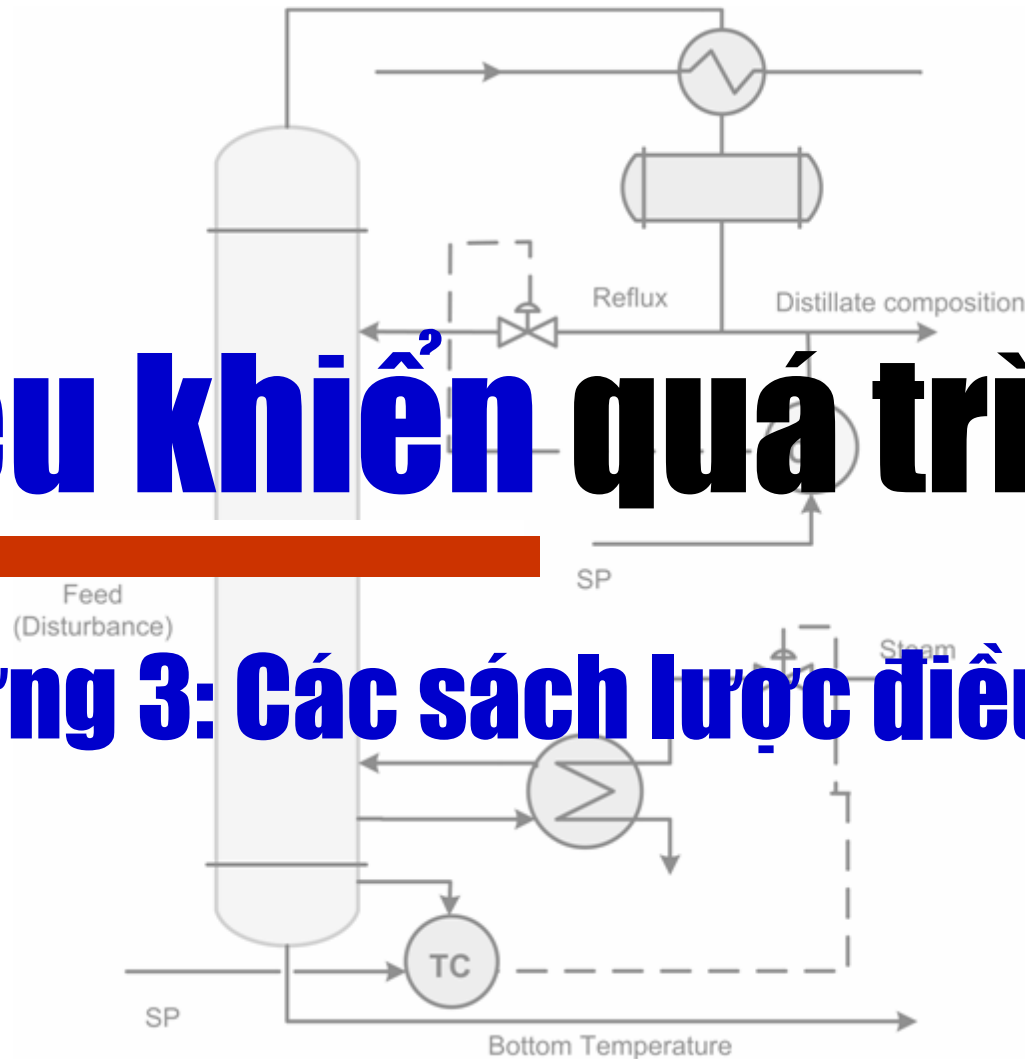


Điều khiển quá trình

Chương 3: Các sách lược điều khiển

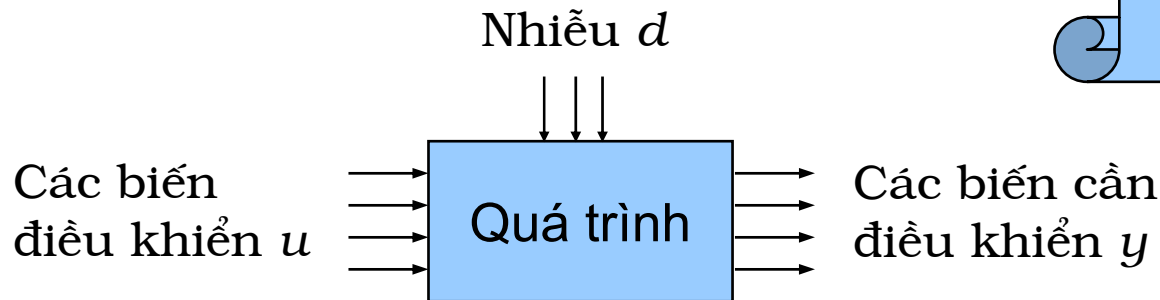


Nội dung chương 3

- 3.1 Khái niệm
- 3.2 Điều khiển truyền thẳng
- 3.3 Điều khiển phản hồi
- 3.4 Điều khiển cascade
- 3.5 Điều khiển tỉ lệ
- 3.6 Điều khiển lựa chọn
- 3.7 Điều khiển phân vùng
- 3.8 Các cấu trúc điều khiển hệ MIMO
- 3.9 Thiết kế cấu trúc điều khiển hệ MIMO

3.1 Khái niệm

Lưu ý:
 u, r, y, d
là các biến
của mô hình
chuẩn hóa $G(s)$



- Bài toán điều khiển quá trình: duy trì $y \approx r$ trong khi
 - thay đổi giá trị đặt r
 - có tác động của nhiễu d
 - tồn tại nhiễu đo n
 - mô hình quá trình không chính xác

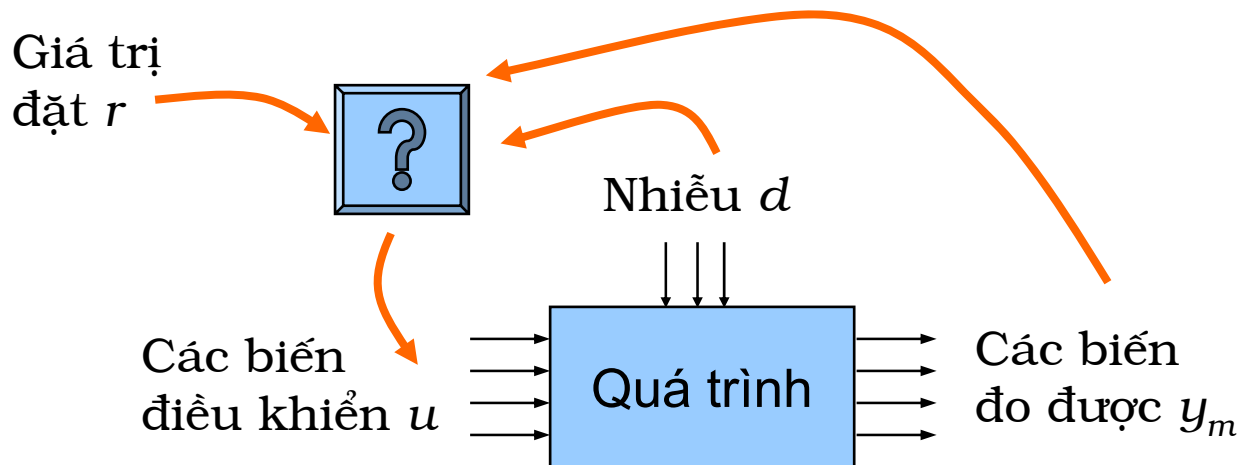
Các mục tiêu cụ thể của điều khiển

- Ổn định hệ thống
- Tốc độ đáp ứng nhanh và chất lượng đáp ứng tốt:
 - Đáp ứng với thay đổi giá trị đặt
 - Đáp ứng với nhiễu quá trình
 - Ít nhạy cảm với nhiễu đo
- Giá trị biến điều khiển thay đổi chậm hoặc thay đổi ít
- Bền vững:
 - Ổn định bền vững
 - Chất lượng bền vững

Các vấn đề phức tạp

- Nhiều quá trình phức tạp, khó điều khiển (tương tác nhiều chiều, hệ pha không cực tiểu, giới hạn về giá trị và tốc độ thay đổi của biến điều khiển, giới hạn về phạm vi thay đổi cho phép của biến được điều khiển,...)
- Mô hình khó xây dựng chính xác
- Nhiều khó đo, khó biết trước
- Khả năng thực thi, cài đặt luật điều khiển có giới hạn
- Trình độ hiểu biết của kỹ sư vận hành về lý thuyết điều khiển hạn chế
- ...

Sách lược điều khiển



- Sách lược/cấu trúc điều khiển (control strategy/structure):
nguyên tắc về mặt cấu trúc trong sử dụng thông tin về các biến quá trình để đưa ra tác động điều khiển.
- Sách lược điều khiển
 - Điều khiển đơn biến hay đa biến?
 - Phối hợp sử dụng các biến vào nào và như thế nào để điều khiển những biến ra nào?

Các sách lược điều khiển cơ bản

■ Hệ SISO:

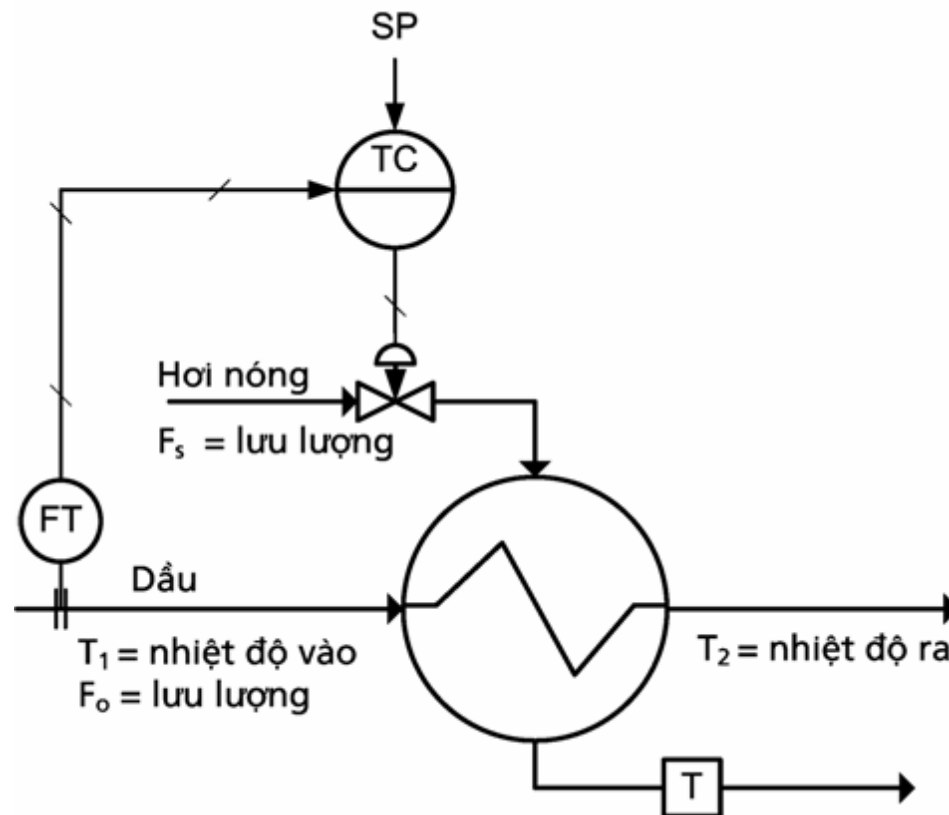
- Điều khiển truyền thẳng (*feedforward control*)
- Điều khiển phản hồi (*feedback control*)
- Điều khiển tầng (*cascade control*)
- Điều khiển tỉ lệ (*ratio control*)
- Điều khiển lựa chọn (*selective control*)
- Điều khiển phân vùng (*split-range control*)

■ Hệ MIMO:

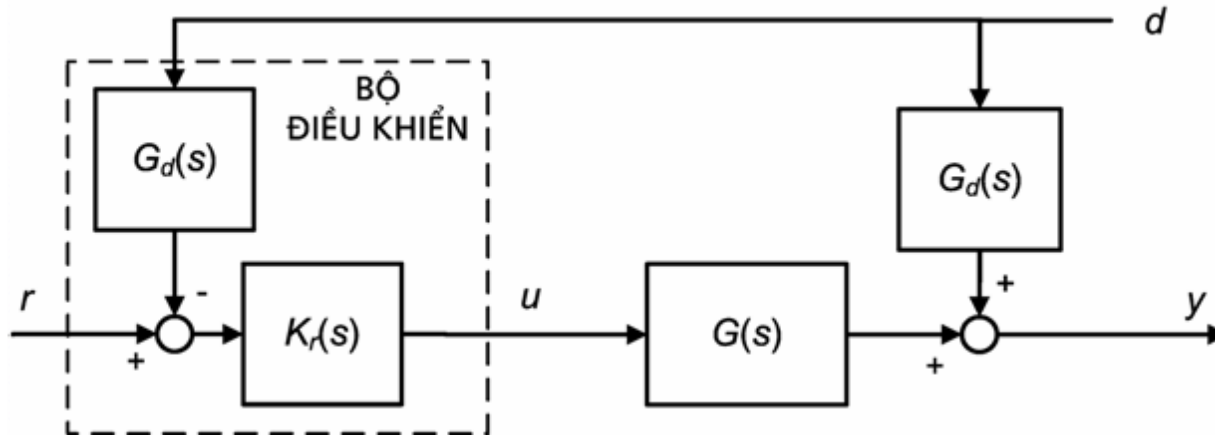
- Điều khiển tập trung (*centralized control*)
 - Điều khiển tách kênh
 - Điều khiển nhiều chiều
- Điều khiển phi tập trung (*decentralized control*)
- Điều khiển phân cấp (*hierarchical control*)

3.2 Điều khiển truyền thẳng

- Ví dụ điều khiển quá trình trao đổi nhiệt:
 - Điều chỉnh lưu lượng hơi nóng vào F_s để duy trì nhiệt độ dầu ra T_2 tại giá trị đặt mong muốn



Cấu trúc cơ bản



- Nguyên lý:
 - Giả thiết: Mô hình chính xác, nhiễu đo được
 - Đo nhiễu quá trình d , tính toán u sao cho $y \approx r$:

$$u = K_r(s)(r - G_d(s)d) \quad (3.1)$$

$$K_r(s) \approx G(s)^{-1}$$

- Không thực hiện đo y

Phân tích chất lượng

a) Điều khiển lý tưởng

$$K_r = G^{-1}$$

$$u = K_r(r - G_d d) = G^{-1}(r - G_d d) \quad (3.2)$$

$$\Rightarrow y = Gu + G_d d = GG^{-1}(r - G_d d) + G_d d = r$$

b) Sai lệch mô hình đối tượng (giả sử $d = 0$):

$$G_{\text{thực}} = G + \Delta G$$

$$\Rightarrow y = (G + \Delta G)G^{-1}r = r + \frac{\Delta G}{G}r \quad (3.3)$$

c) Sai lệch mô hình nhiễu: **sai lệch điều khiển**

$$G_{d \text{ thực}} = G_d + \Delta G_d$$

$$\Rightarrow y = r - G_d d + (G_d + \Delta G_d)d = r + \Delta G_d d \quad (3.4)$$

d) Tồn tại nhiều không đo được:

$$y = Gu + G_d d + G_{d2} d_2 = r + G_{d2} d_2 \quad (3.5)$$

sai lệch điều khiển

=> Hệ mất ổn định khi G_{d2} không ổn định

e) Mô hình có điểm không nằm nửa bên phải mặt phẳng phức
=> Bộ điều khiển lý tưởng không ổn định, cần xấp xỉ!

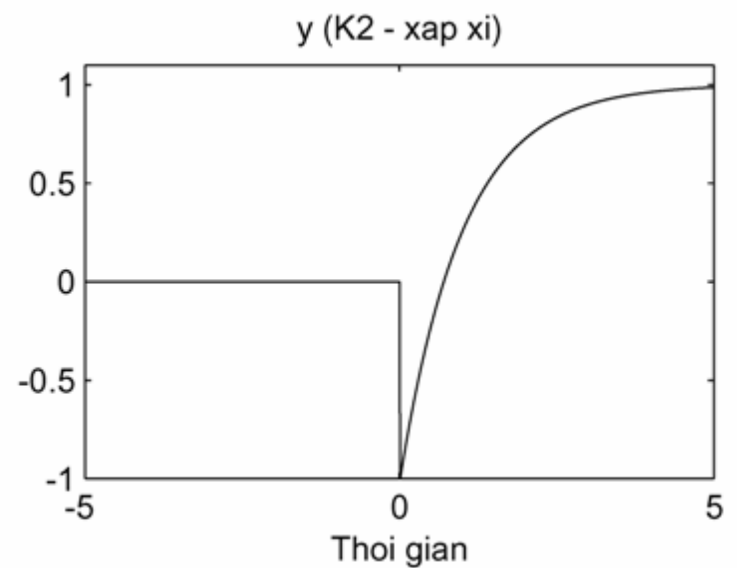
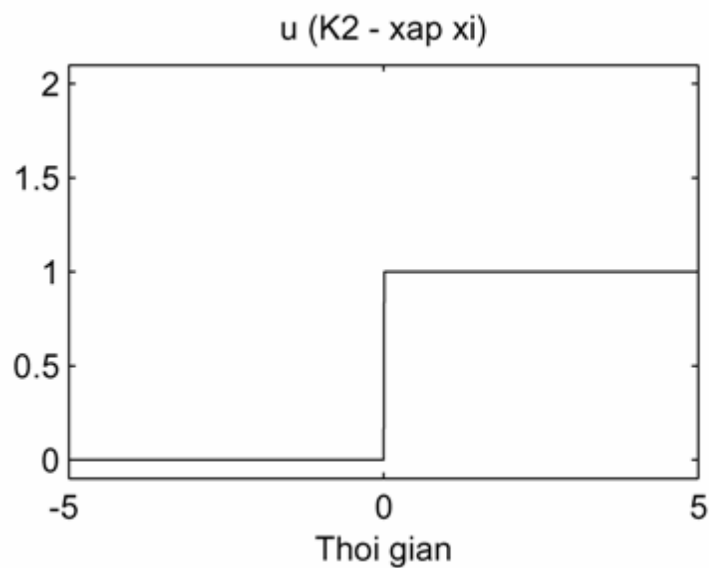
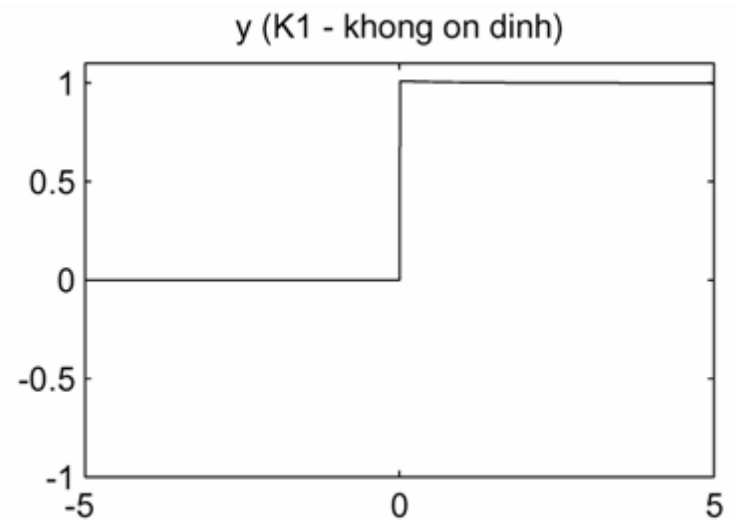
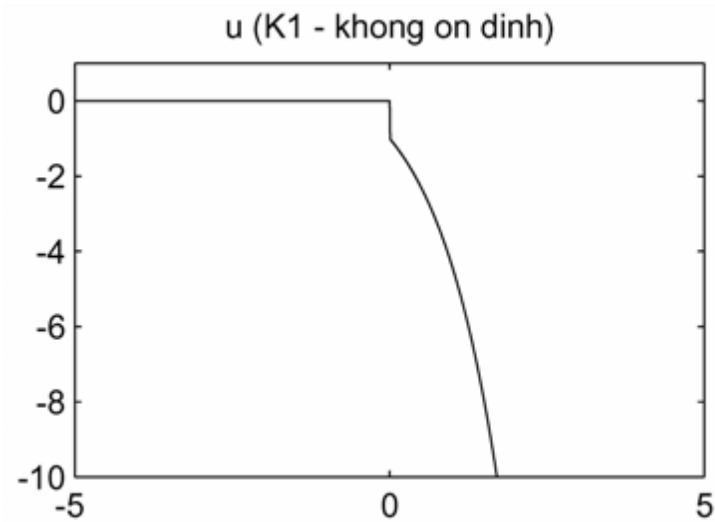
Ví dụ mô hình đối tượng: $G(s) = \frac{1-s}{1+s}$

Bộ điều khiển lý tưởng không ổn định => hệ mất ổn định nội!

$$K_{r1}(s) = G(s)^{-1} = \frac{1+s}{1-s}$$

Bộ điều khiển xấp xỉ (cho trạng thái xác lập):

$$K_{r2} = G(0)^{-1} = 1$$



Phân tích chất lượng (tiếp)

- f) Mô hình có thời gian trễ hoặc có bậc mẫu số lớn hơn bậc tử số
=> Bộ điều khiển lý tưởng không có tính nhân quả (*non-causal*)

Ví dụ mô hình đối tượng: $G(s) = \frac{1 + s}{1 - s + s^2} e^{-s}$

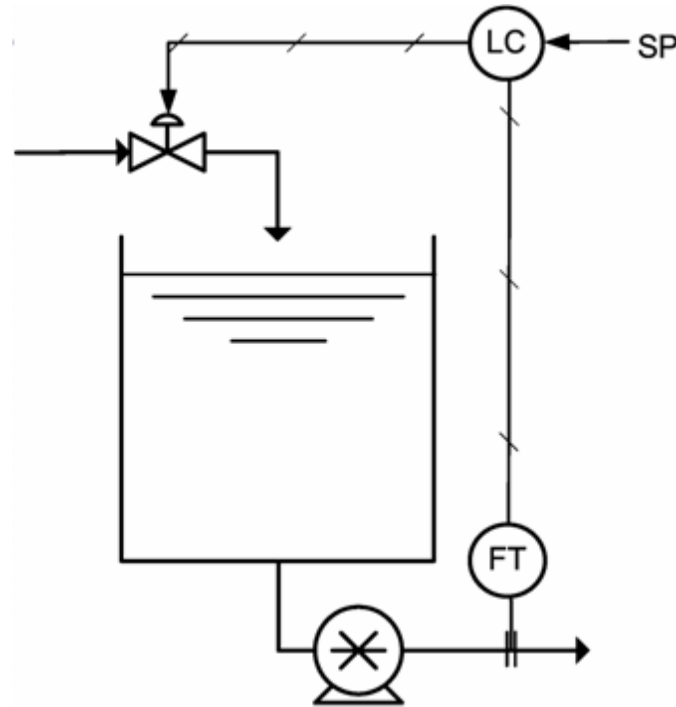
Bộ điều khiển lý tưởng không có tính nhân quả: $K_r(s) = \frac{1 - s + s^2}{1 + s} e^s$

=> Chỉ thực hiện được khi bù tín hiệu chủ đạo biết trước, không dùng cho bù nhiễu, hoặc phải xấp xỉ bộ điều khiển

- g) Quá trình không ổn định: Bộ điều khiển lý tưởng triệt tiêu điểm cực không ổn định => Hệ thống không có tính ổn định nội, chỉ cần có nhiễu đầu vào rất nhỏ có thể làm cho hệ mất ổn định

$$y = G(u + d_u) + G_d d = r + \underbrace{G d_u}_{(3.6)}$$

Ví dụ: Điều khiển mức



- Nguyên lý điều khiển: Lưu lượng vào phải bằng lưu lượng ra
- Vấn đề: Chỉ cần sai số nhỏ trong giá trị đo lưu lượng hoặc sai số nhỏ trong mô hình van điều khiển cũng có thể làm tràn bình hoặc cạn bình

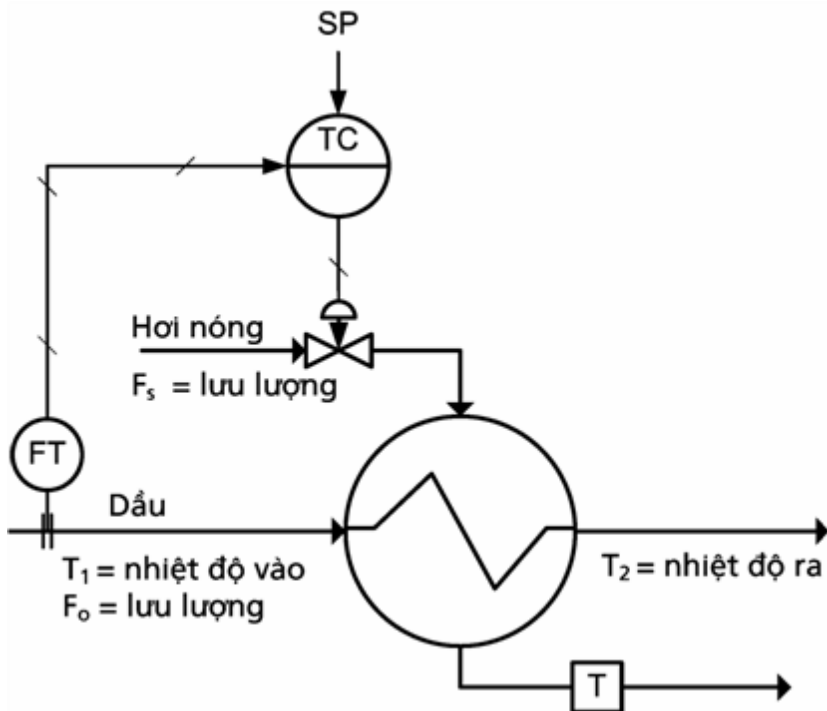
Tóm lược về điều khiển truyền thẳng

- Ưu điểm:
 - Đơn giản
 - Tác động nhanh (bù nhiều kịp thời trước khi ảnh hưởng tới đầu ra)
- Hạn chế:
 - Phải đặt thiết bị đo nhiều
 - Không loại trừ được ảnh hưởng của nhiễu không đo được
 - Nhạy cảm với sai lệch mô hình (mô hình quá trình và mô hình nhiễu)
 - Bộ điều khiển lý tưởng có thể không ổn định hoặc không thực hiện được => phương pháp xấp xỉ
 - Không có khả năng ổn định một quá trình không ổn định
- Ứng dụng chủ yếu:
 - Các bài toán đơn giản, quá trình pha cực tiểu, yêu cầu chất lượng không cao
 - Kết hợp với ĐK phản hồi nhằm cải thiện tốc độ đáp ứng của hệ kín: Bù nhiễu đo được (chủ yếu là bù tĩnh), lọc trước (tiền xử lý) tín hiệu chủ đạo
 - Điều khiển tỉ lệ (mục 3.5)

Các bước thiết kế khâu bù tĩnh

1. Xác định biến cần điều khiển, chọn biến điều khiển và các biến nhiễu đo được.
2. Xây dựng mô hình đối tượng, viết các phương trình cân bằng vật chất hoặc/và phương trình cân bằng năng lượng ở trạng thái xác lập.
3. Thay thế biến được điều khiển bằng giá trị đặt, giải phương trình cân bằng cho biến điều khiển theo giá trị đặt và các biến nhiễu.
4. Phân tích và đánh giá ảnh hưởng của sai lệch mô hình tới chất lượng điều khiển.
5. Loại bỏ các nguồn nhiễu có ảnh hưởng không đáng kể để tiết kiệm chi phí đặt cảm biến.
6. Chỉnh định lại các tham số của khâu truyền thẳng cho điểm làm việc quan tâm để bù lại sai lệch mô hình và các nguồn nhiễu đã loại bỏ.
7. Bổ sung các bộ điều khiển phản hồi để triệt tiêu sai lệch tĩnh, giảm tác động của sai lệch mô hình và của nhiễu không đo được.

Ví dụ: Điều khiển quá trình trao đổi nhiệt



Bỏ qua tổn thất nhiệt, ta có phương trình cân bằng năng lượng:

$$F_o C_p (T_2 - T_1) = \lambda F_s \quad (3.7)$$

trong đó:

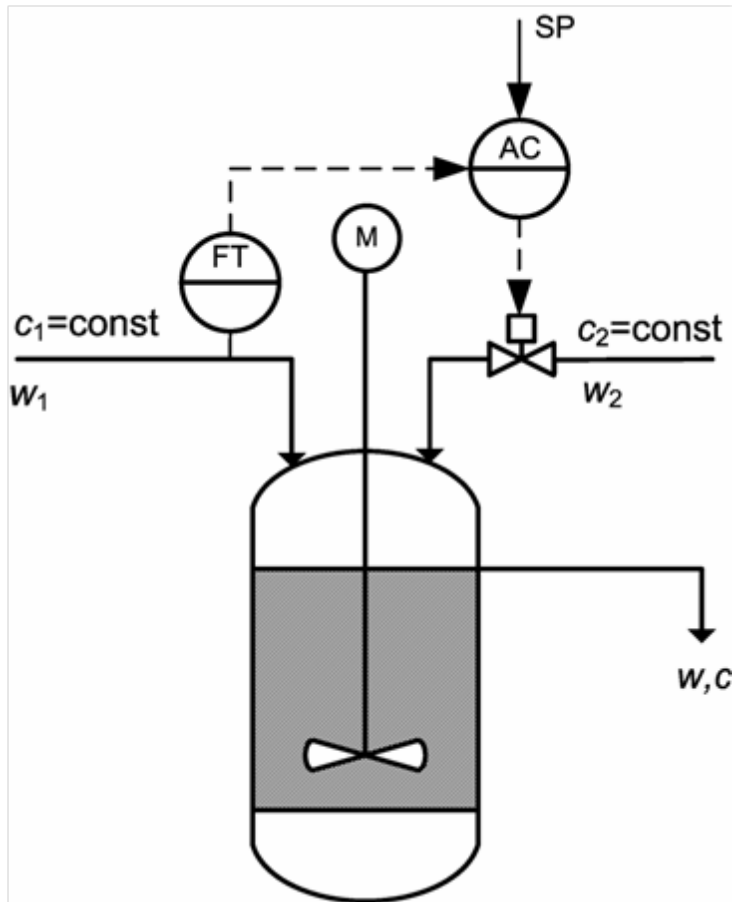
C_p – nhiệt dung của dầu

λ – hệ số nhiệt tỏa ra do quá trình hơi nước ngưng tụ.

Thay thế T_2 bằng giá trị đặt (SP):

$$F_s = F_o \frac{C_p}{\lambda} (SP - T_1) \quad (3.8)$$

Ví dụ: Điều khiển quá trình trộn



Giả thiết:

- c_1 và c_2 là hằng số
- lưu lượng w ra tùy ý (tự chảy)

Phương trình cân bằng:

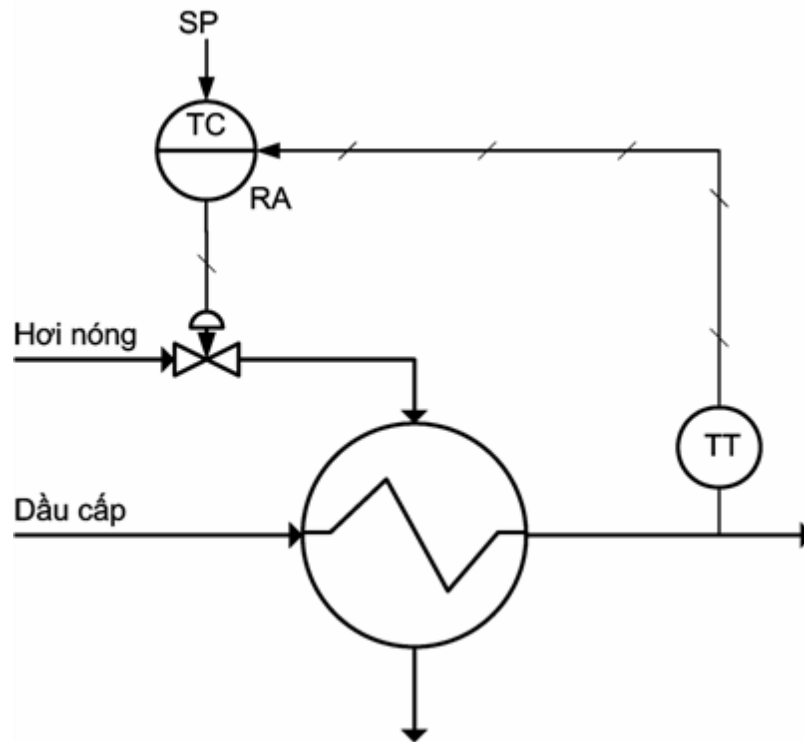
$$w_1 c_1 + w_2 c_2 = (w_1 + w_2) c \quad (3.9)$$

Thay thế c bằng giá trị đặt (SP):

$$w_2 = \frac{w_1 (SP - c_1)}{c_2 - SP} \quad (3.10)$$

3.3 Điều khiển phản hồi

- Ví dụ: Điều khiển quá trình trao đổi nhiệt

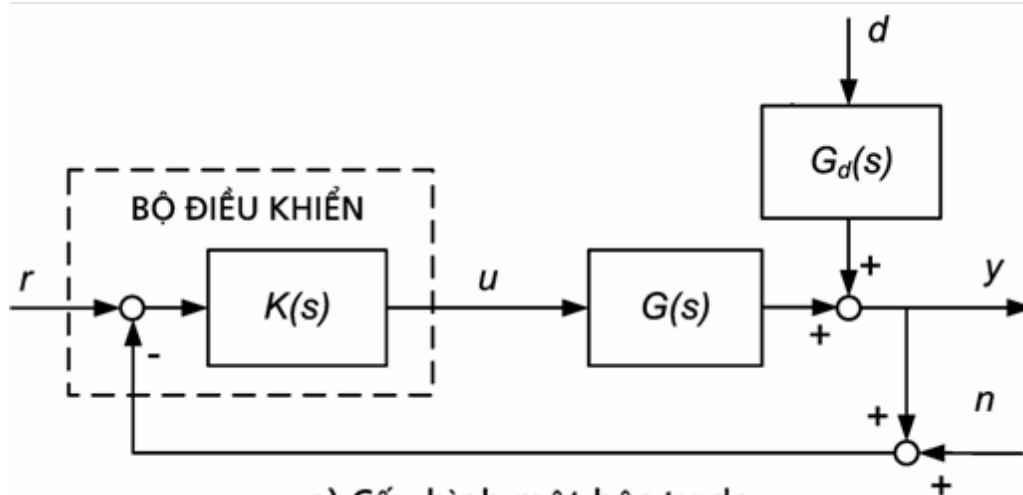


- Nguyên lý điều khiển: Điều chỉnh lưu lượng hơi nóng (biến điều khiển) dựa trên sai lệch giữa nhiệt độ dầu ra (biến được điều khiển) và giá trị đặt (SP)

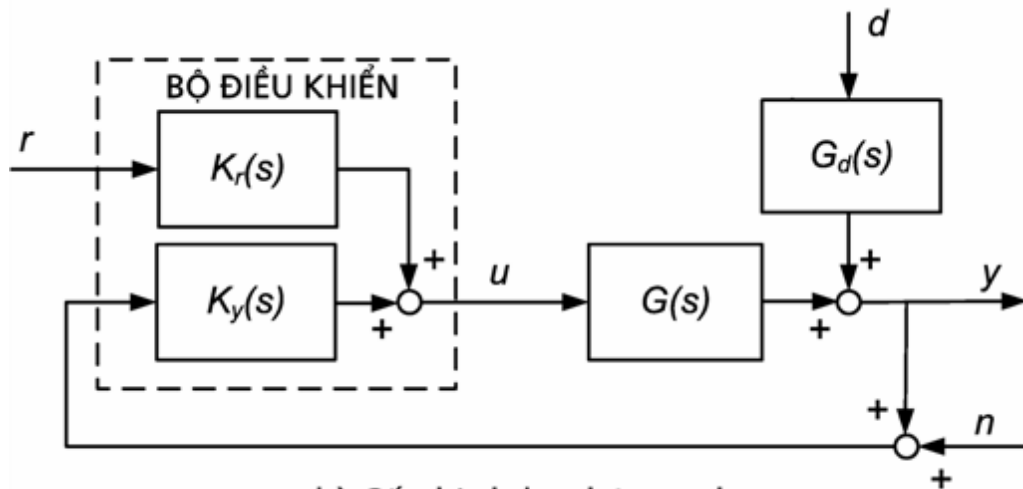
Chiều tác động của bộ điều khiển phản hồi

- Tác động thuận (*direct acting*, DA): Đầu ra của bộ điều khiển tăng khi biến được điều khiển tăng và ngược lại
- Tác động nghịch (*reverse acting*, RA): Đầu ra của bộ điều khiển giảm khi biến được điều khiển tăng và ngược lại
- Sự lựa chọn chiều tác động phụ thuộc:
 - Đặc điểm của quá trình: quan hệ giữa biến điều khiển và biến được điều khiển
 - Kiểu tác động của van điều khiển (chú ý chiều mũi tên trên ký hiệu van điều khiển):
 - Đóng an toàn (*fail close, air-to-open*), chiều tác động thuận
 - Mở an toàn (*fail open, air-to-close*), chiều tác động nghịch
 - ☞ Coi đối tượng điều khiển = quá trình + van điều khiển => chiều tác động phụ thuộc vào dấu của hệ số khuếch đại tĩnh của đối tượng
- Trong ví dụ: tác động nghịch
 - Quá trình: Hơi nóng nhiều -> nhiệt độ tăng
 - Van điều khiển: Đóng an toàn

Cấu hình bộ điều khiển phản hồi



a) Cấu hình một bậc tự do



b) Cấu hình hai bậc tự do

Đáp ứng với giá trị đặt và đáp ứng với nhiễu có ràng buộc với nhau \Rightarrow không thể thiết kế để điều khiển độc lập hoàn toàn theo ý muốn

Thêm khả năng thiết kế bộ điều khiển $K_r(s)$ để cải thiện đáp ứng với thay đổi giá trị đặt

Tại sao phải điều khiển phản hồi?

Xét cấu hình bộ điều khiển một bậc tự do:

$$y = GK(r - y - n) + G_d d \quad (3.11)$$

$$(1 + GK)y = GKr + G_d d - GK n \quad (3.12)$$

Đáp ứng hệ kín:

$$y = \frac{L}{1 + L} r + \frac{G_d}{1 + L} d - \frac{L}{1 + L} n = Tr + G_d Sd - Tn \quad (3.13)$$

Sai lệch điều khiển:

$$e = r - y = \frac{1}{1 + GK} r - \frac{G_d}{1 + GK} d + \frac{GK}{1 + GK} n = Sr - G_d Sd + Tn \quad (3.14)$$

Vai trò của điều khiển phản hồi

1. Một quá trình không ổn định chỉ có thể ổn định (hóa) bằng cách sử dụng mạch phản hồi nhằm dịch các điểm cực sang bên trái trục ảo của mặt phẳng phức (quan sát đa thức mẫu số $1 + GK$ trong 3.13 và 3.14)
2. Khi nhiễu không đo được hoặc mô hình đáp ứng nhiễu bất định thì tác động của nó chỉ có thể triệt tiêu thông qua nguyên lý phản hồi:

$$|GK| \gg 1 \Rightarrow \left| \frac{G_d}{1 + GK} \right| \approx 0$$

3. Mô hình đối tượng không chính xác, do vậy việc triệt tiêu sai lệch tĩnh chỉ có thể thông qua quan sát diễn biến đầu ra:

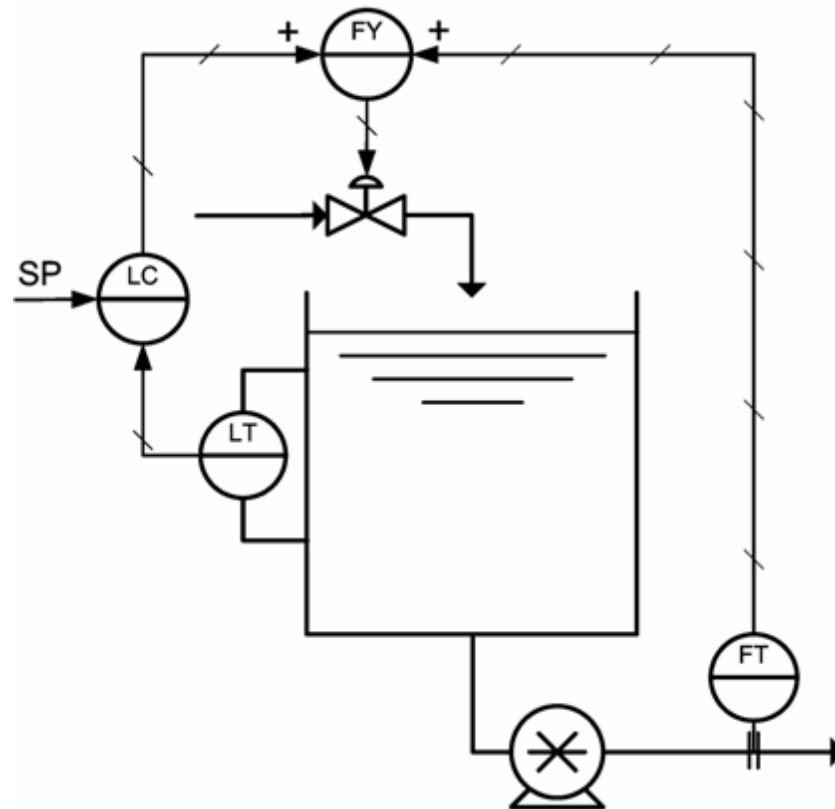
$$n \approx 0, |GK| \gg 1 \Rightarrow e \approx 0$$

Các vấn đề của điều khiển phản hồi

- Một vòng điều khiển kín chứa một đối tượng ổn định cũng có thể trở nên mất ổn định
- Điều khiển phản hồi cần bổ sung các cảm biến
- Nhiều đo có thể ảnh hưởng lớn tới chất lượng điều khiển (để ý số hạng cuối cùng trong biểu thức 3.13 và 3.14) => cần có phương pháp lọc nhiễu, xử lý số liệu đo tốt
- Khó mà có một bộ điều khiển phản hồi tốt nếu như không có một mô hình tốt
- Với một số quá trình có đáp ứng ngược hoặc có trễ (hệ pha không cực tiểu), một bộ điều khiển phản hồi được thiết kế thiếu thận trọng thậm chí có thể làm xấu đi đặc tính đáp ứng
- Bộ điều khiển phản hồi đáp ứng chậm với nhiễu tải và thay đổi giá trị đặt

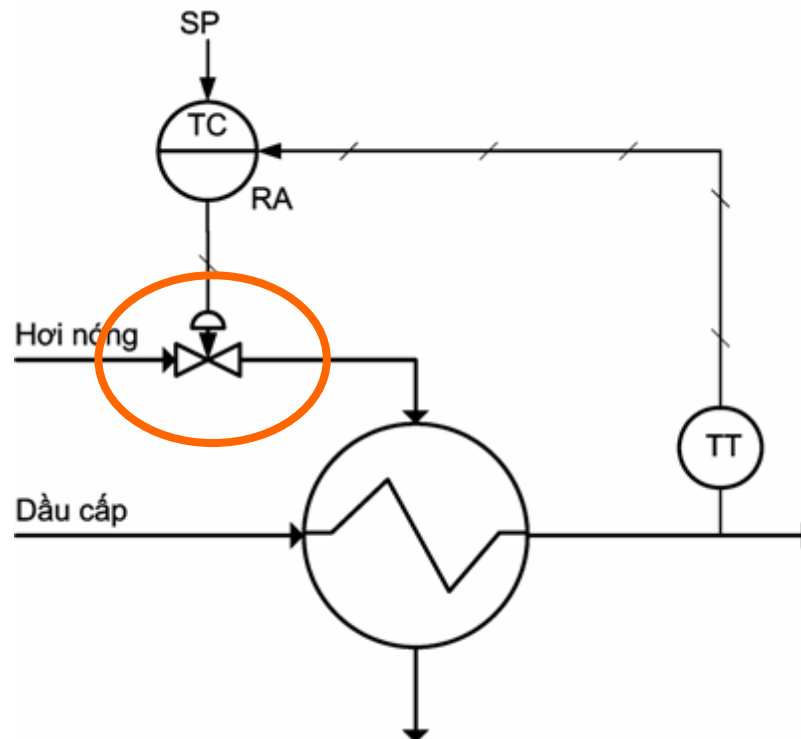
Kết hợp với sách lược truyền thẳng

- Ví dụ điều khiển mức:
 - Khâu truyền thẳng: bù nhiễu
 - Khâu phản hồi: ổn định hệ thống và triệt tiêu sai lệch tĩnh



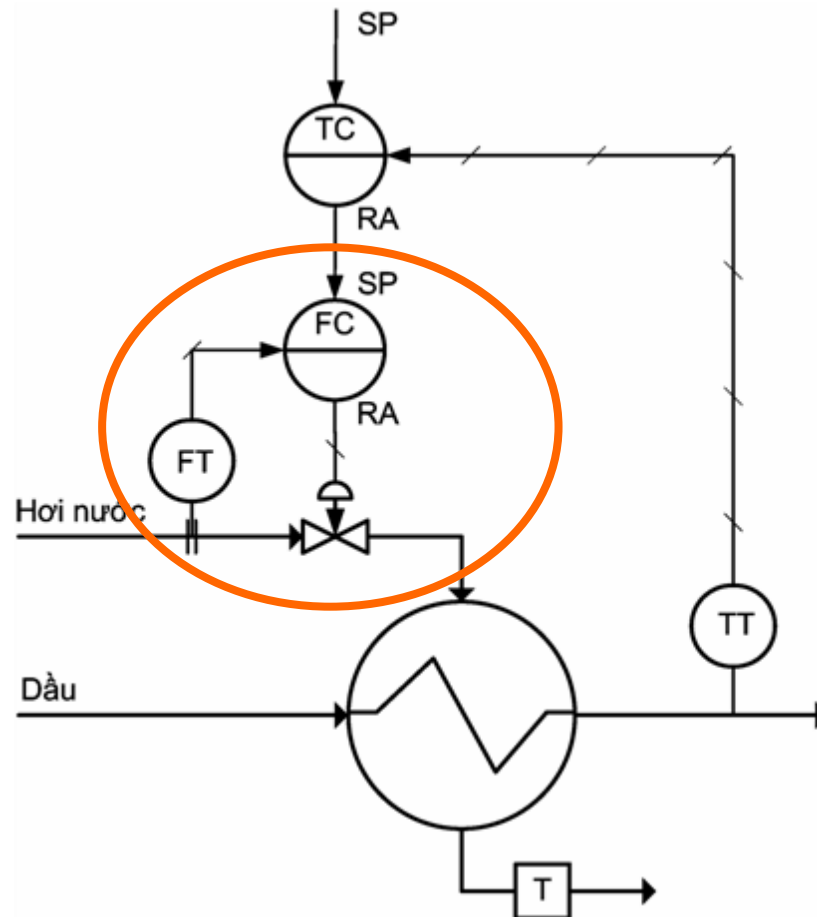
3.4 Điều khiển tầng (cascade)

- Đặt vấn đề: Tác động của nhiễu với các quá trình chậm (nhiệt độ, mức và nồng độ) hoặc có trễ lớn => các vòng điều chỉnh đơn khó mang lại tốc độ đáp ứng nhanh cũng như độ quá điều chỉnh nhỏ.
- Ví dụ tiêu biểu: Với cùng độ mở van, thay đổi áp suất dòng chảy/dòng hơi ảnh hưởng lớn tới lưu lượng



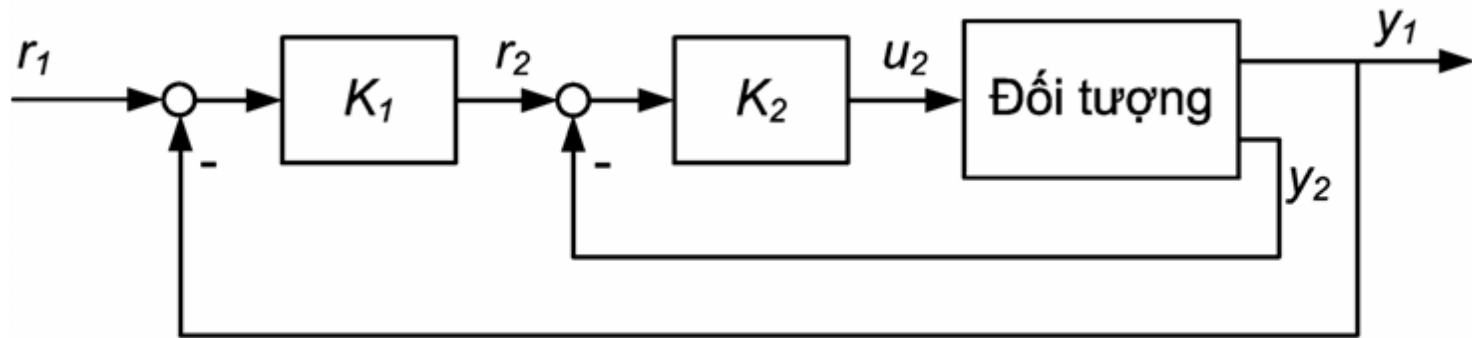
Ví dụ điều khiển buồng trao đổi nhiệt

- Giải pháp: Triệt tiêu sớm ảnh hưởng của nhiễu bằng cách sử dụng một vòng điều chỉnh trong, sử dụng thêm một đại lượng đo

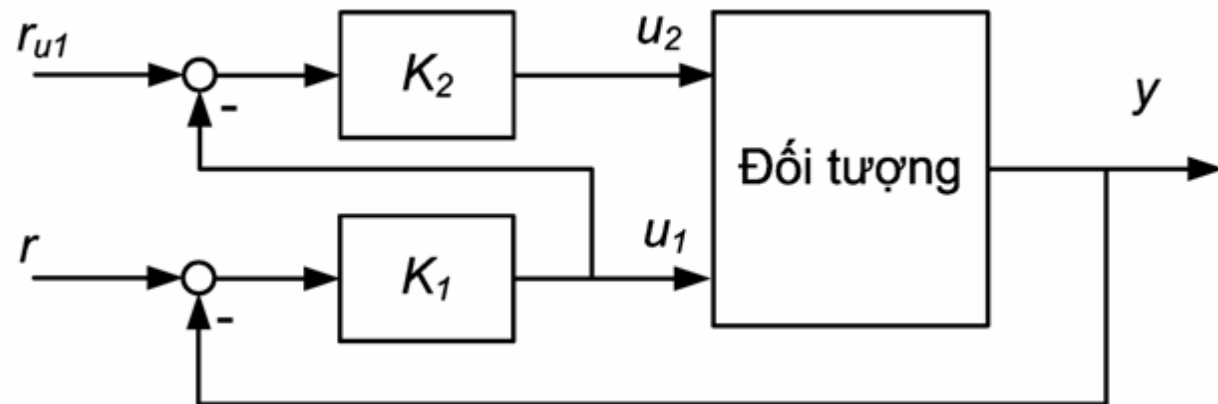


Hai cấu trúc cơ bản

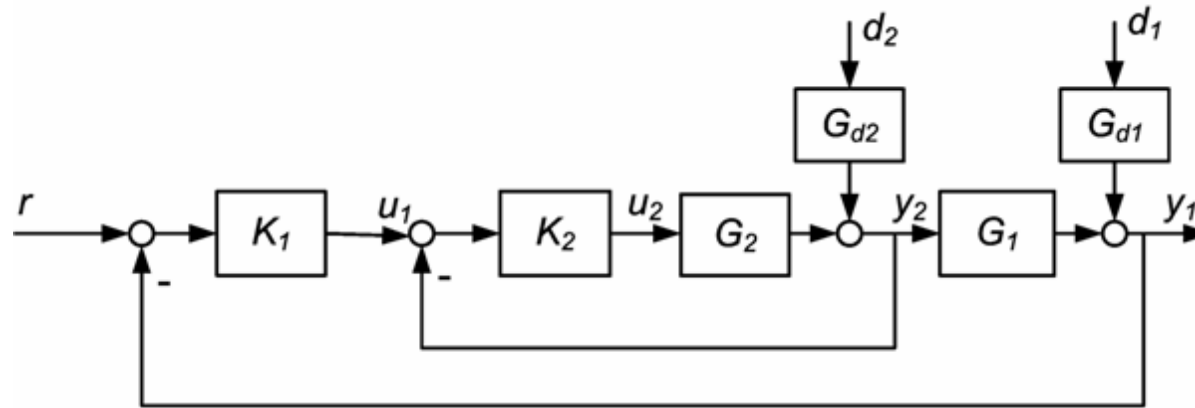
- Cấu trúc kinh điển (cấu trúc nối tiếp): thêm một biến đo



- Cấu trúc song song: thêm một biến điều khiển



Phân tích chất lượng (cấu trúc kinh điển)



- Đáp ứng hệ kín:

$$\begin{aligned}
 y_2 &= \frac{K_1 L_2}{1 + L_2 + L_1 L_2} (r - G_{d1} d_1) + \frac{G_{d2}}{1 + L_2 + L_1 L_2} d_2, \quad L_1 = K_1 G_1, L_2 = K_2 G_2 \\
 y_1 &= \frac{L_1 L_2}{1 + L_2 + L_1 L_2} r + \frac{(1 + L_2) G_{d1}}{1 + L_2 + L_1 L_2} d_1 + \frac{G_1 G_{d2}}{1 + L_2 + L_1 L_2} d_2 \\
 &= \frac{L_1}{1 / L_2 + 1 + L_1} r + \frac{(1 + 1 / L_2) G_{d1}}{1 / L_2 + 1 + L_1} d_1 + \frac{G_1 G_{d2} / L_2}{1 / L_2 + 1 + L_1} d_2
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

- Với $|L_2| \gg 1$ trong dải tần quan tâm (của L_1), ta có:

$$|y_1| \approx \left| \frac{L_1}{1 + L_1} r \right| + \left| \frac{G_{d1}}{1 + L_1} d_1 \right| + \left| \frac{G_1 G_{d2}}{L_2 (1 + L_1)} d_2 \right|$$

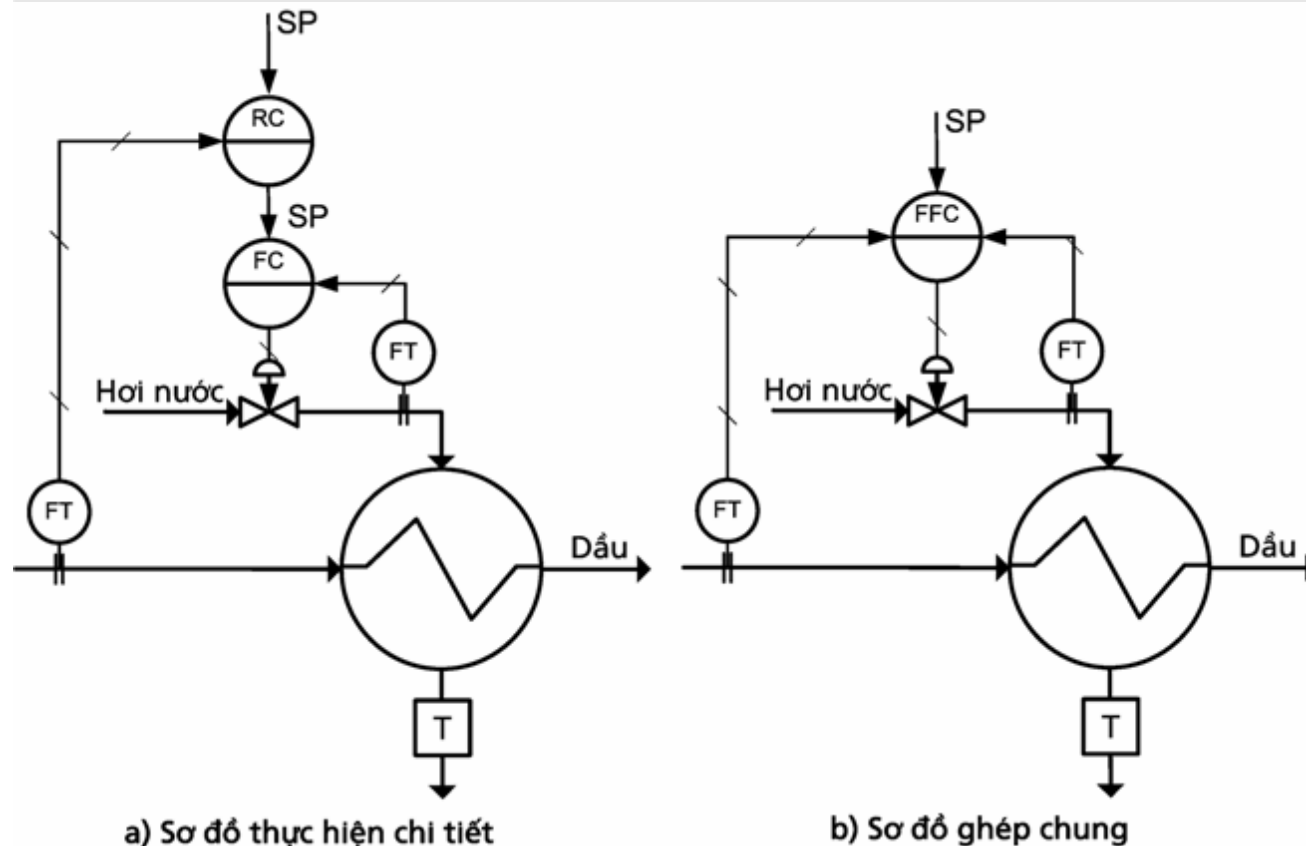
Ảnh hưởng của d_2 giảm đi nhiều!

Khi nào sử dụng sách lược cascade?

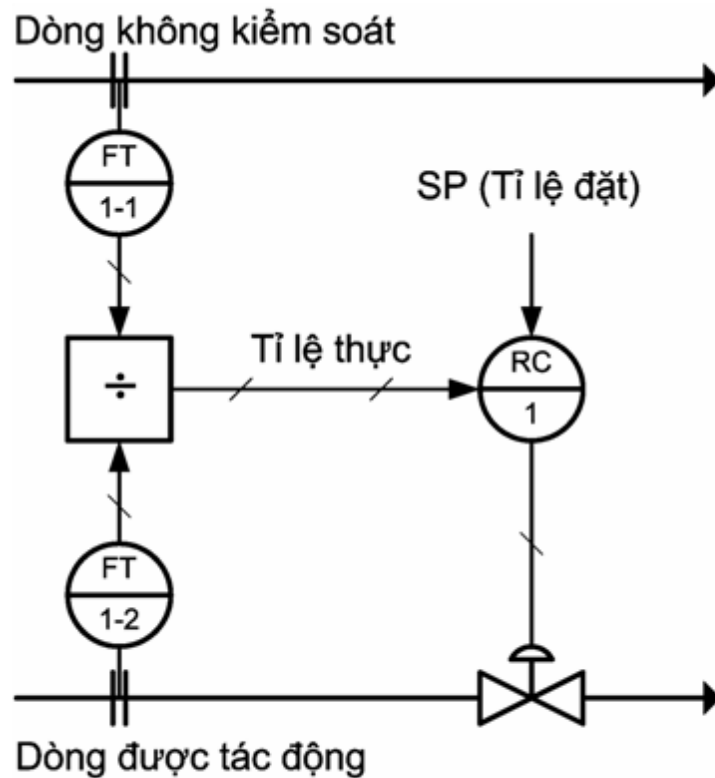
- Vòng điều khiển phản hồi đơn không đáp ứng được yêu cầu chất lượng
- Có thể dễ dàng đo được và điều khiển được một biến quá trình thứ hai (có liên quan tới biến thứ nhất)
- Biến được điều khiển thứ hai thể hiện rõ rệt ảnh hưởng của nhiễu khó đo được
- Có một quan hệ nhân quả giữa biến điều khiển và biến được điều khiển thứ hai (có thể cùng là một biến)
- Đặc tính động học của biến thứ hai phải nhanh hơn đặc tính động học của biến thứ nhất

3.5 Điều khiển tỉ lệ (ratio control)

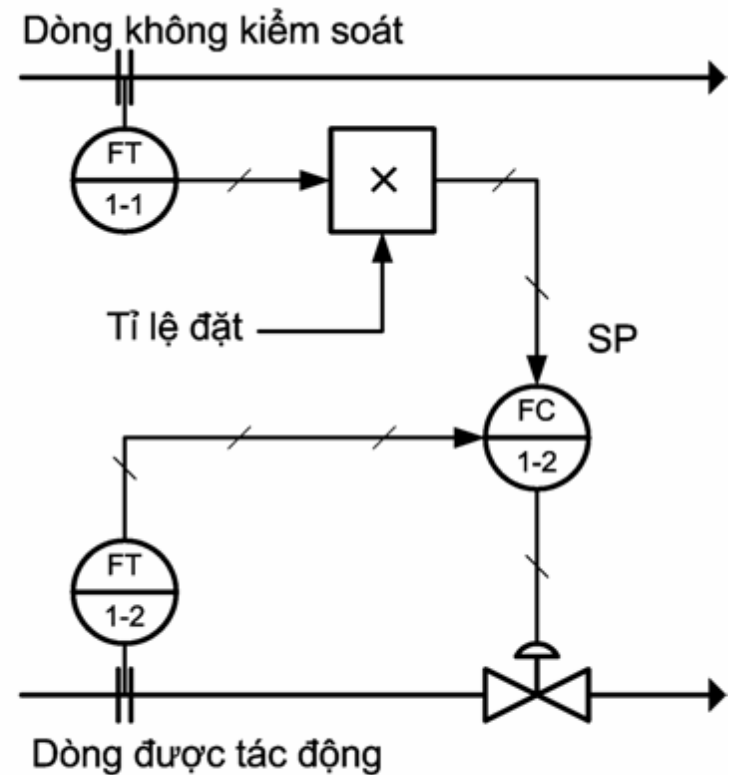
- Điều khiển tỉ lệ là duy trì tỉ lệ giữa hai biến nhằm điều khiển gián tiếp một biến thứ ba => thực chất là một dạng điều khiển truyền thẳng.
- Ví dụ: Điều khiển quá trình trao đổi nhiệt



Hai cấu trúc thường dùng

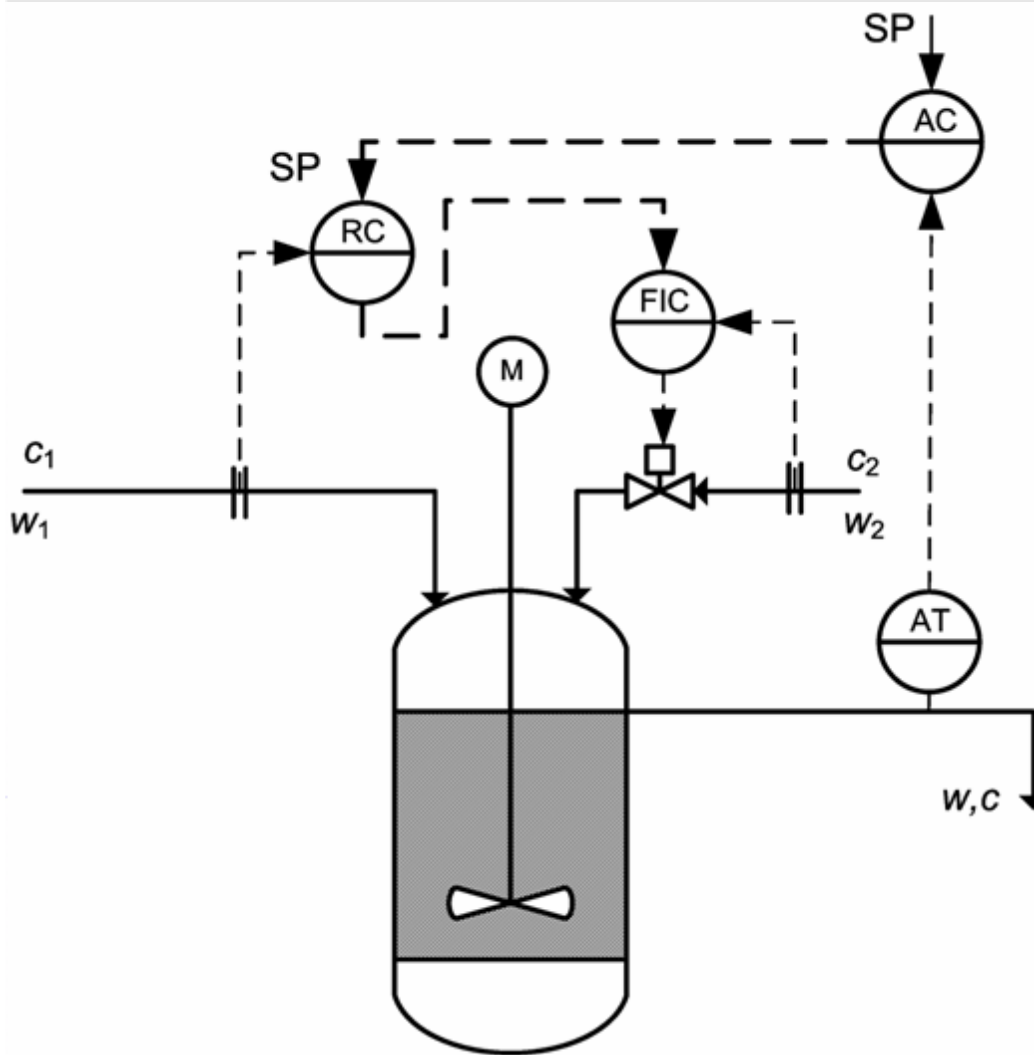


a) Tính tỉ lệ phản hồi



b) Tính lưu lượng đặt

Ví dụ điều khiển tỉ lệ quá trình trộn (kết hợp với phản hồi)

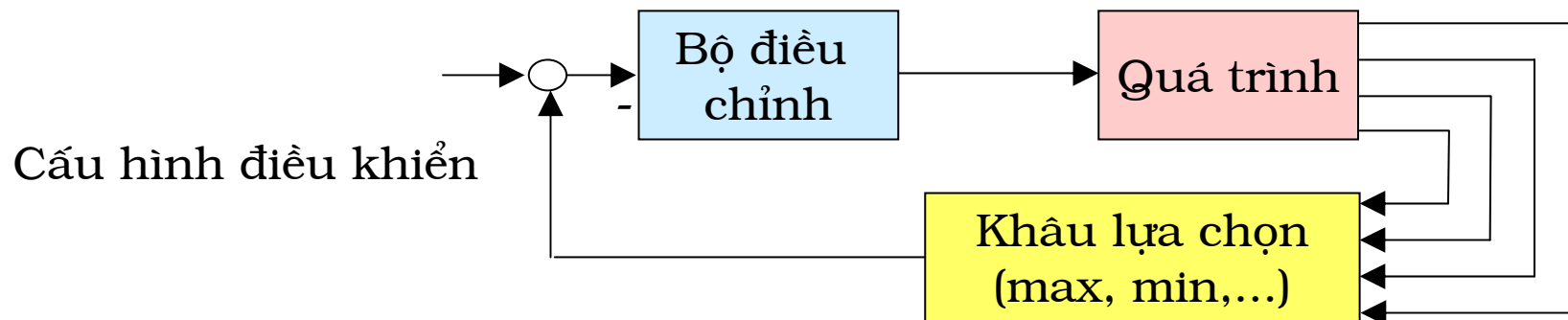


3.6 Điều khiển lựa chọn

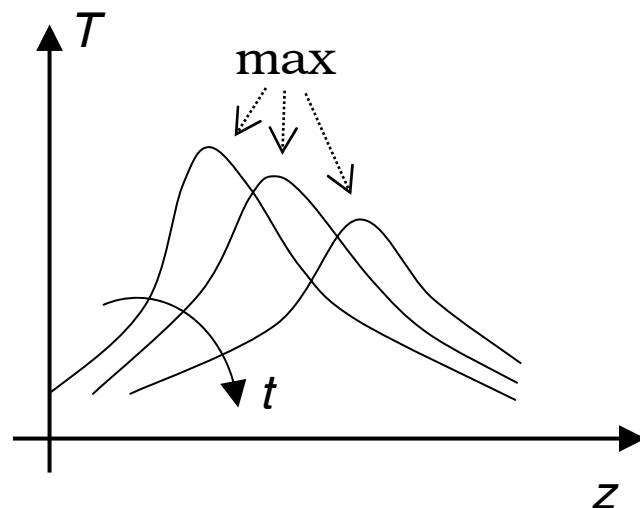
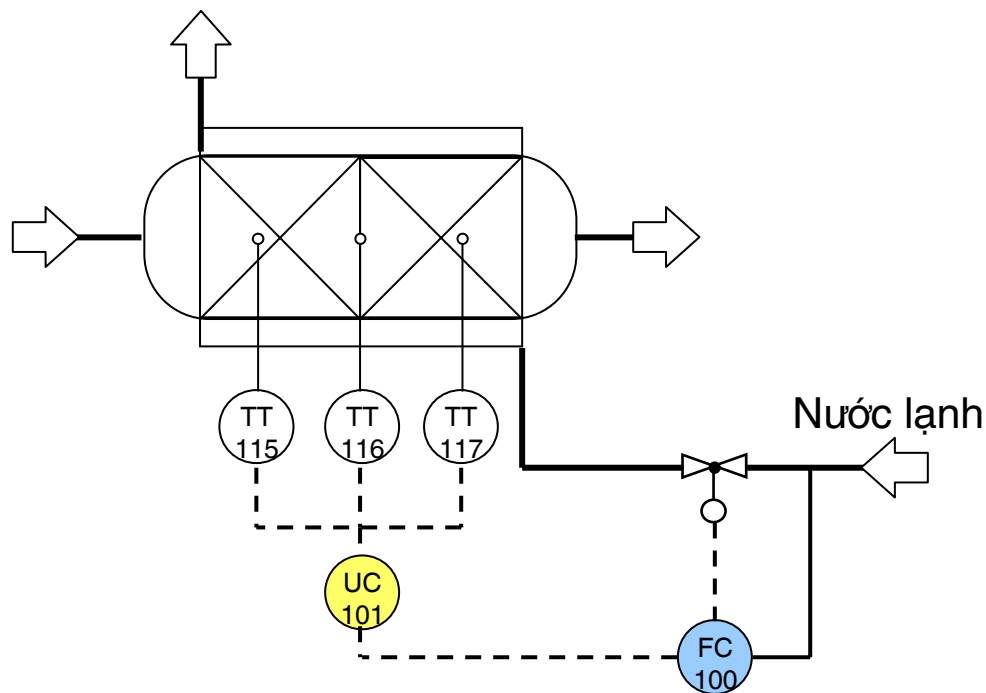
- Sử dụng khâu lựa chọn tín hiệu: Một biến điều khiển (một thiết bị chấp hành)
- Lựa chọn tín hiệu đo: Điều khiển giới hạn (*limit control*)
 - Một biến được điều khiển
 - Nhiều tín hiệu đo (đo ở nhiều vị trí khác nhau)
 - Một vòng điều chỉnh
- Lựa chọn tín hiệu điều khiển: Điều khiển lấn át (*override control*)
 - Hai (nhiều) biến được điều khiển, hai (nhiều) tín hiệu đo
 - Hai (nhiều) vòng điều chỉnh

=> Đảm bảo an toàn

Điều khiển giới hạn

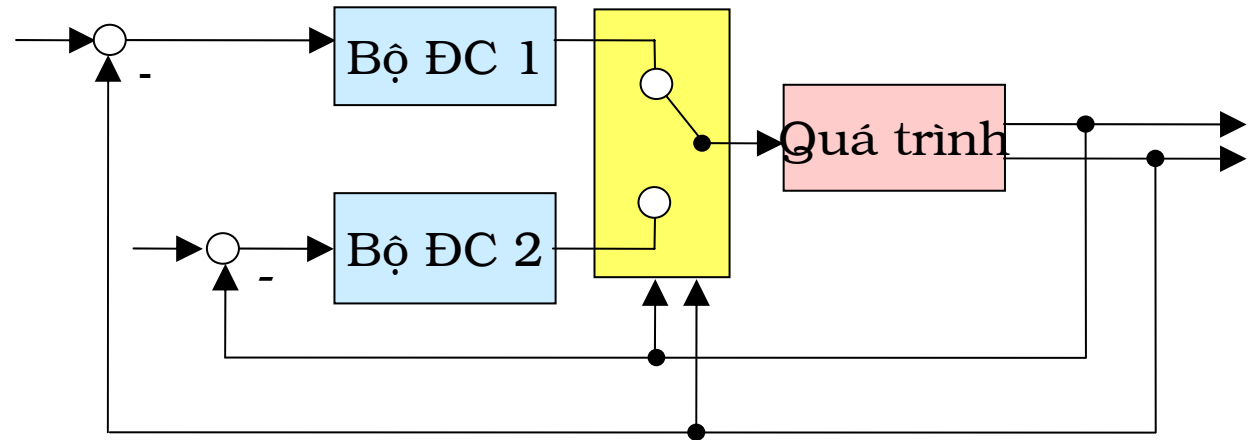


Ví dụ: Điều khiển nhiệt độ trong một lò phản ứng

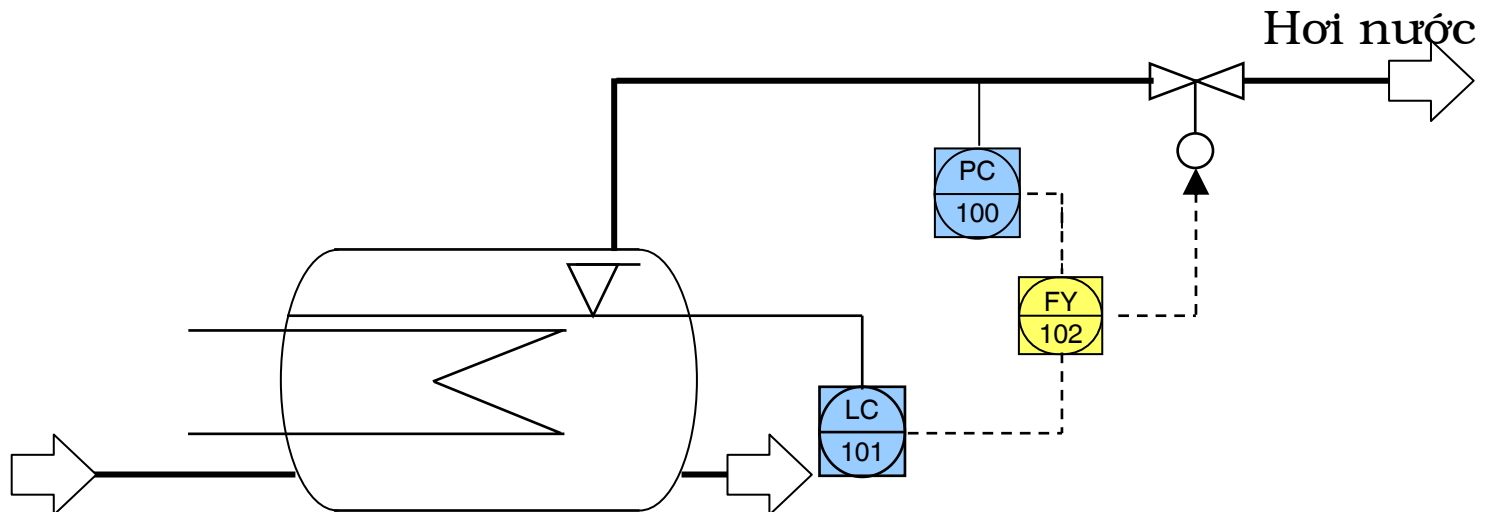


Điều khiển lẫn át

Cấu hình điều khiển



Ví dụ: Điều khiển nổi hơi

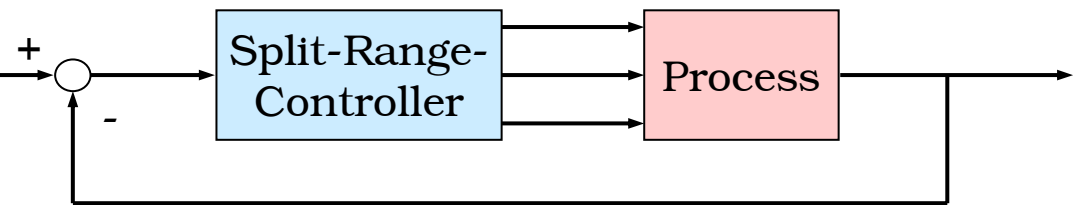


Ứng dụng của điều khiển lẫn át

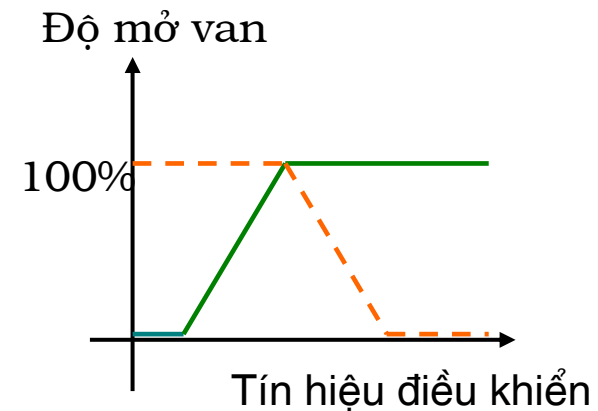
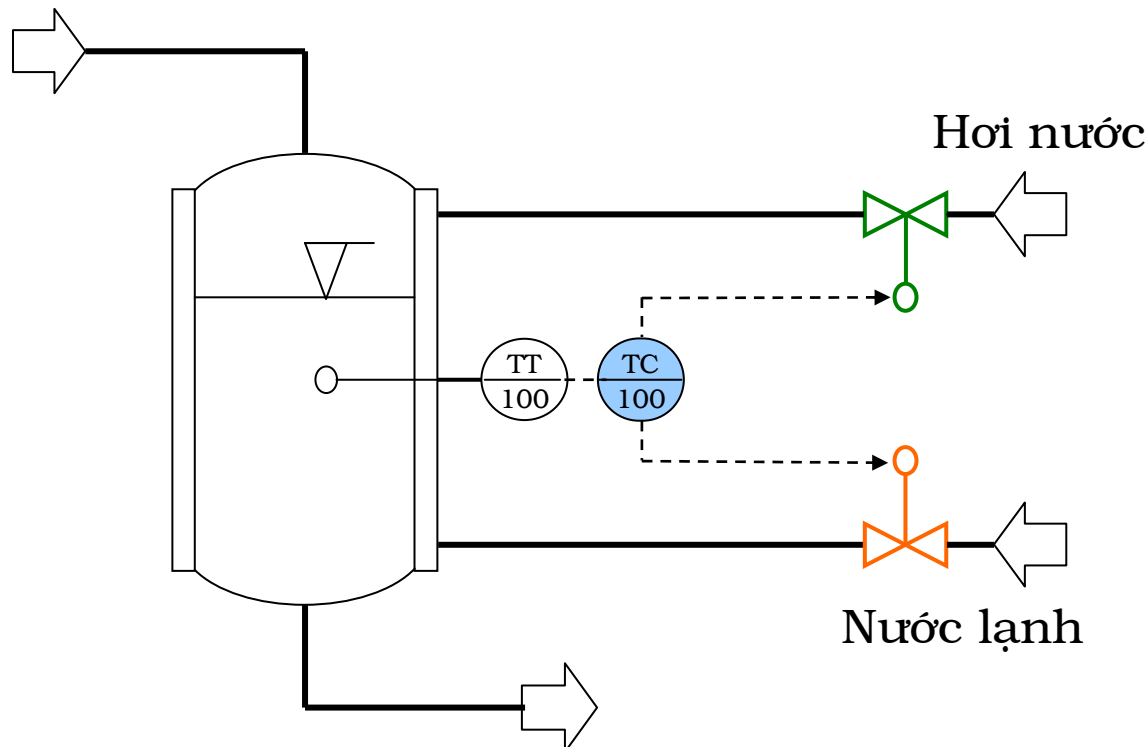
- ❑ Tránh tình trạng tràn trong một tháp chưng cất bằng cách hạn chế lưu lượng hơi cấp nhiệt hoặc lưu lượng cấp liệu.
- ❑ Phòng ngừa tình trạng giá trị mức quá cao hoặc quá thấp trong một bình chứa bằng cách giành quyền can thiệp mạnh vào các van điều chỉnh (van cấp hoặc van xả).
- ❑ Phòng tránh áp suất hoặc nhiệt độ quá cao trong một lò phản ứng bằng cách giảm lượng nhiệt cấp.
- ❑ Giảm lượng nhiên liệu cấp cho một buồng đốt nhằm tránh tình trạng hàm lượng ôxy quá thấp trong khí thải.
- ❑ Tránh trường hợp áp suất quá cao trong một đường ống (hơi nước hoặc khí) bằng cách mở van trên đường tránh (bypass).

3.7 Điều khiển phân vùng

- Một biến được điều khiển
- Nhiều biến điều khiển hoặc nhiều phần tử chấp hành



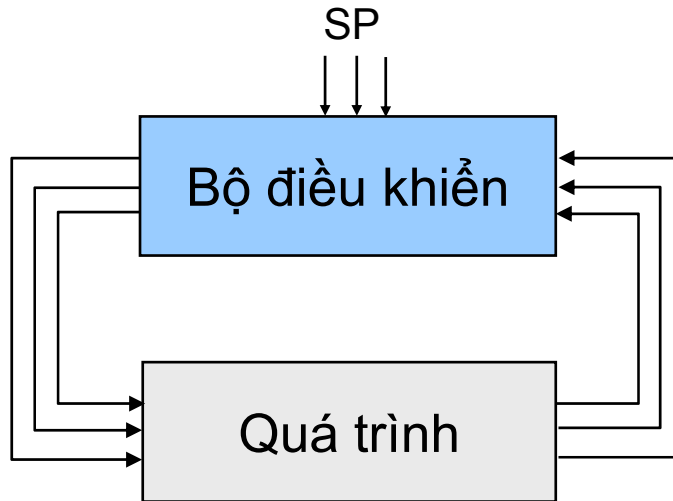
Ví dụ: Điều khiển nhiệt độ bình phản ứng



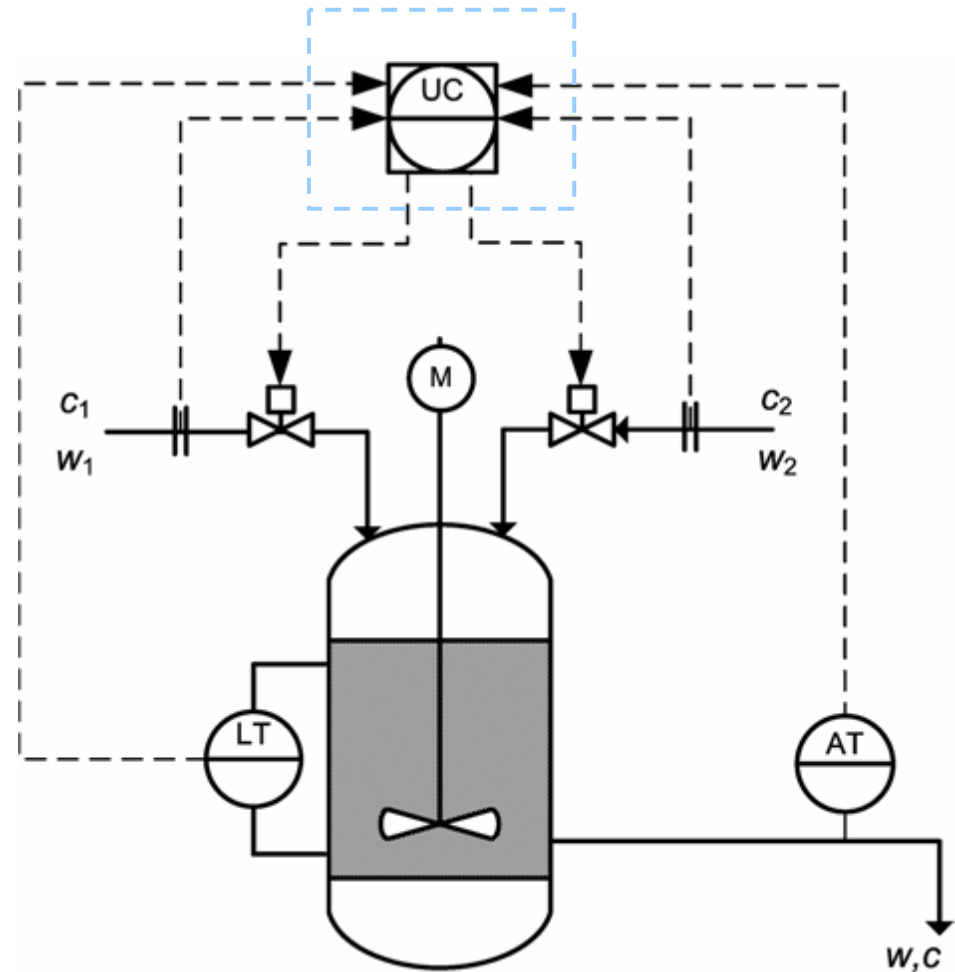
3.8 Các cấu trúc điều khiển hệ MIMO

- Điều khiển tập trung (*centralized control*), điều khiển đa biến (*multivariable control*):
 - Một bộ điều khiển nhiều chiều (nhiều vào/nhiều ra)
 - Thiết kế theo phương pháp tách kênh hoặc phương pháp thiết kế đa biến
- Điều khiển phi tập trung (*decentralized control*), điều khiển nhiều vòng (*multiloop control*):
 - Phân chia hệ thống thành các bài toán nhỏ dễ giải quyết hơn (đơn biến hoặc đa biến)
 - Thực hiện bởi nhiều bộ điều khiển độc lập
- Điều khiển phân cấp (*hierarchical control*):
 - Phân chia hệ thống thành các vòng điều chỉnh cơ bản (điều chỉnh từng phần, *partial control*) và các vòng điều chỉnh phối hợp (vòng điều khiển chủ, *master control*)
 - Sử dụng cả các bộ điều khiển phân tán và các bộ điều khiển tập trung

Điều khiển tập trung

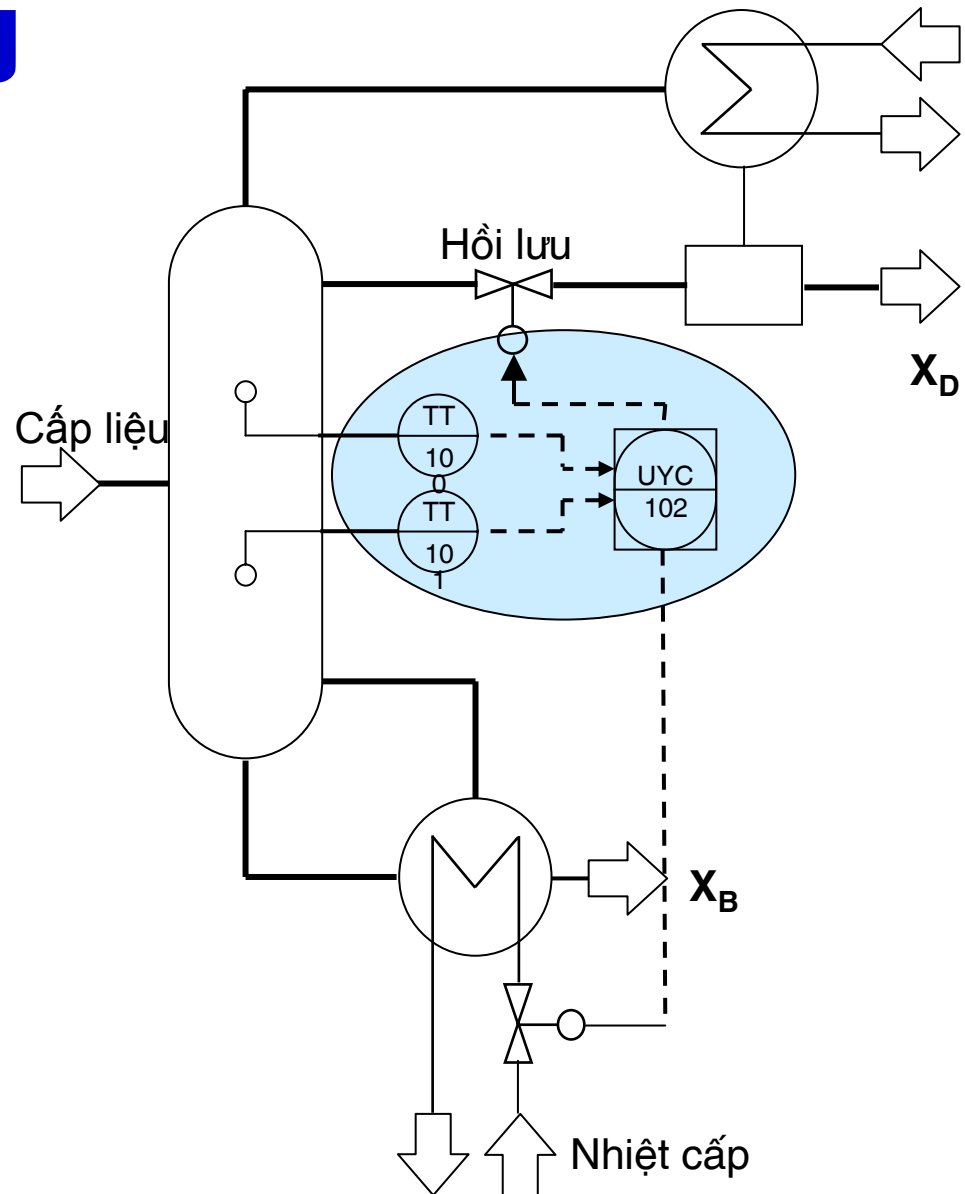


- Ví dụ: Điều khiển bình trộn
 - Biến được điều khiển: mức và nồng độ ra (c)
 - Biến điều khiển: lưu lượng vào w_1 và w_2

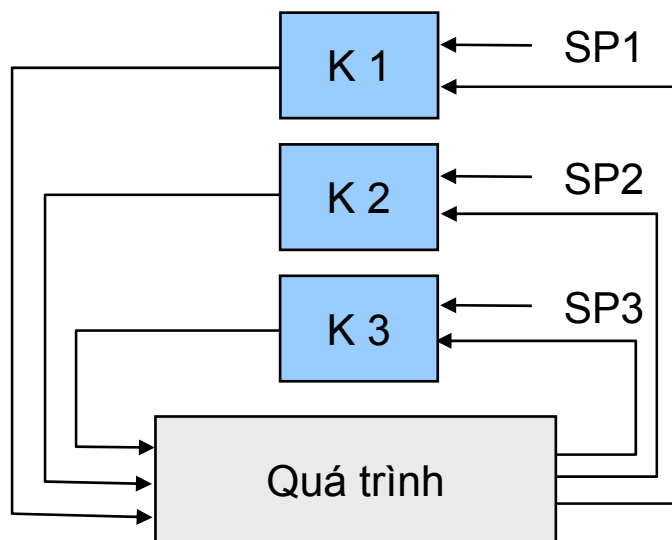


Điều khiển tập trung

- Ví dụ: Tháp chưng cất hai sản phẩm
 - Biến cần điều khiển: nồng độ sản phẩm đỉnh X_D và đáy X_B
 - Biến được điều khiển: Nhiệt độ phân tinh cất và phân chưng luyện của tháp
 - Biến điều khiển: lưu lượng hồi lưu và nhiệt lượng cấp

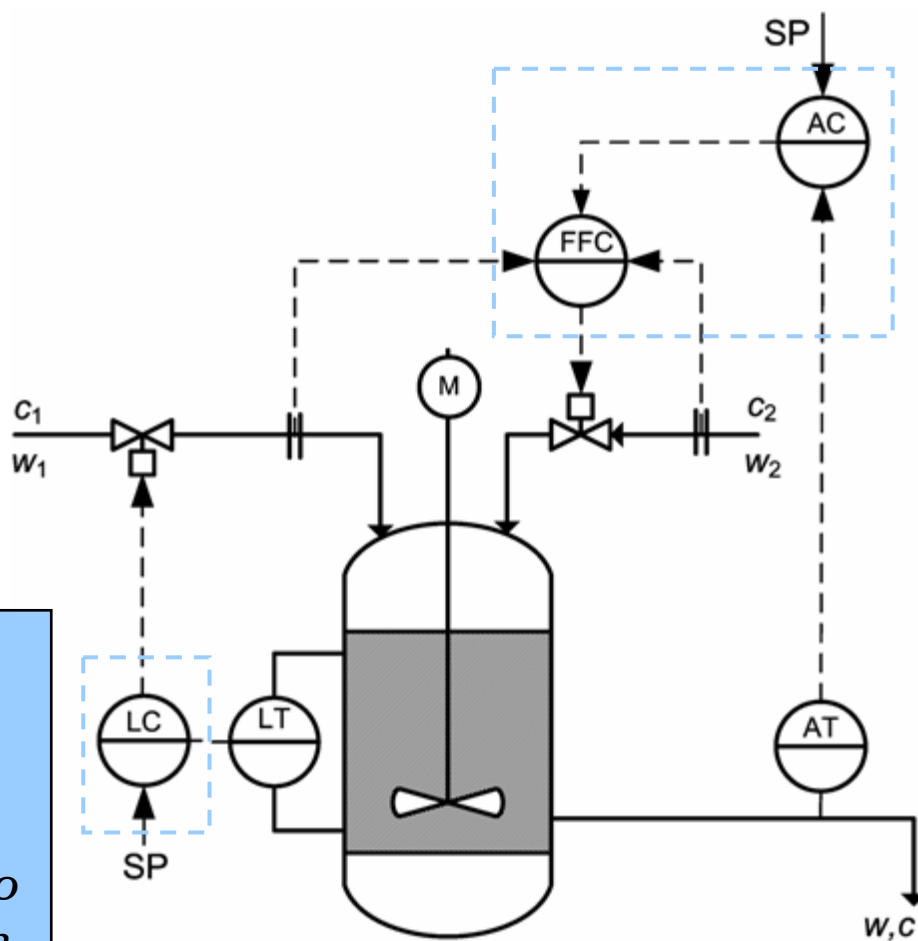


Điều khiển phi tập trung



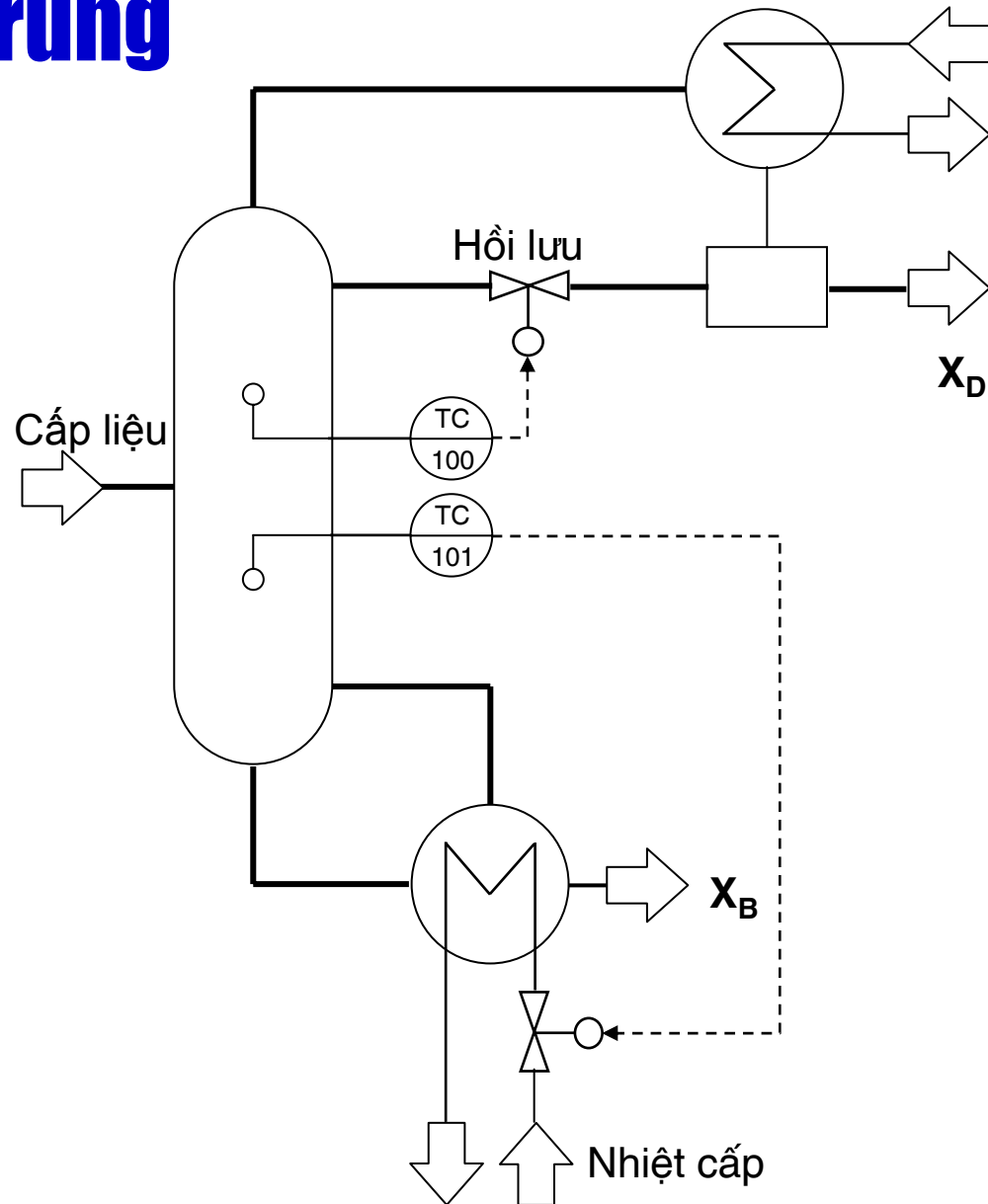
Định nghĩa:

Hệ thống điều khiển bao gồm nhiều bộ điều khiển phản hồi độc lập, mỗi bộ liên kết một tập con (không chia sẻ) các biến đầu ra (đo được) và giá trị đặt với một tập con các biến điều khiển.



Điều khiển phi tập trung

- Ví dụ: Tháp chưng cất hai sản phẩm
 - Biến cần điều khiển: nồng độ sản phẩm đỉnh X_D và đáy X_B
 - Biến được điều khiển: Nhiệt độ phân tinh cất và phân chưng luyện của tháp
 - Biến điều khiển: lưu lượng hồi lưu và nhiệt lượng cấp



So sánh

- Điều khiển tập trung:
 - + Chất lượng cao (nếu mô hình chính xác)
 - + Nhiều phương pháp và công cụ thiết kế hiện đại
 - Xây dựng mô hình quá trình phức tạp
 - Thực hiện giải pháp điều khiển số phức tạp (thiếu thư viện khối có sẵn, chu kỳ trích mẫu khác nhau,...)
 - Khó theo dõi đối với người sử dụng => khó chấp nhận
 - Độ tin cậy không cao
- Điều khiển phi tập trung:
 - + Phương pháp truyền thống trong công nghiệp
 - + Dễ theo dõi
 - + Dễ chỉnh định các tham số điều khiển mà không cần mô hình quá trình chính xác
 - + Độ tin cậy cao
 - Thiết kế sách lược điều khiển phức tạp (ví dụ việc cặp đôi vào/ra)
 - Chất lượng thấp, không phải bao giờ cũng thực hiện được

3.9 Thiết kế cấu trúc phi tập trung

- Các bước thiết kế:
 - Lựa chọn các biến điều khiển, các biến được điều khiển và các biến đo
 - Cặp đôi các biến điều khiển và các biến được điều khiển
 - Áp dụng các sách lược điều khiển cho hệ SISO
- Các vấn đề đặt ra:
 - Khi nào có thể điều khiển phi tập trung?
 - Đánh giá mức độ tương tác giữa các kênh điều khiển
 - Đánh giá chất lượng điều khiển *có thể đạt được* (mức độ khó dễ của bài toán)
 - Vấn đề lựa chọn cặp đôi biến vào/ra
 - Mỗi biến điều khiển ảnh hưởng khác nhau tới biến được điều khiển => chọn cặp vào/ra có sự liên kết mạnh nhất
 - Trường hợp đơn giản => có thể đưa ra kết luận thông qua phân tích quá trình vật lý
 - Số lượng vào/ra lớn => số khả năng cặp đôi rất lớn, cần một phương pháp có tính hệ thống
 - Vấn đề đánh giá chất lượng và tính ổn định toàn hệ thống

3.9.1 Ma trận hệ số tương tác (RGA)

- Khái niệm RGA (*Relative Gain Array*):
 - Bristol đưa ra năm 1966 (AC-11) => chỉ số đánh giá mức độ tương tác giữa các kênh vào/ra trong một hệ MIMO
 - Phục vụ lựa chọn và cặp đôi các biến vào/ra trong xây dựng cấu hình điều khiển phi tập trung
 - Có nhiều tính chất rất hay khác trong đánh giá tính ổn định và chất lượng của hệ điều khiển phi tập trung
- RGA của một ma trận số phức vuông $m \times m$ không suy biến là một ma trận số phức vuông $m \times m$:

$$\text{RGA}(G) \equiv \Lambda(G) \triangleq G \times (G^{-1})^T \quad (3.17)$$

với ký hiệu \times là phép nhân từng phần tử (*tích Schur, tích Hadamard*)

- Ví dụ: $G = \begin{bmatrix} 1 & -2 \\ 3 & 4 \end{bmatrix}, G^{-1} = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.2 \\ -0.3 & 0.1 \end{bmatrix}, \Lambda(G) = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.6 \\ 0.6 & 0.4 \end{bmatrix}$

Diễn giải ý nghĩa ma trận RGA qua ví dụ 2x2

Xét hệ 2x2 ở trạng thái xác lập ($s = 0$):

$$G(0) = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix}$$
$$\Lambda(G) = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & 1 - \lambda_{11} \\ 1 - \lambda_{11} & \lambda_{11} \end{bmatrix}, \lambda_{11} = \frac{1}{1 - g_{12}g_{21} / g_{11}g_{22}} \quad (3.19)$$

Khi $u_2 = 0$:

$$\Delta y_1 \big|_{u_2=0} = g_{11} \Delta u_1 \quad (3.20)$$

Khi $u_2 \neq 0$ để giữ $y_2=0$:

$$\Delta y_1 \big|_{y_2=0} \approx \hat{g}_{11} \Delta u_1 = (g_{11} / \lambda_{11}) \Delta u_1 = (g_{11} - \underbrace{\frac{g_{12}g_{21}}{g_{22}}}) \Delta u_1 \quad (3.21)$$

Tác động gián tiếp

$$\text{Nếu } \lambda_{11} = 1 \Rightarrow g_{12}g_{21} = 0 \Rightarrow \begin{cases} g_{12} = 0 \\ g_{21} = 0 \end{cases}$$

=> Không có tương tác hai chiều, dễ điều khiển phi tập trung

Tổng quát hóa cho hệ $m \times n$

$$\frac{y(s)}{u(s)} = G(s) = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) & \cdots & g_{1m}(s) \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ g_{m1}(s) & \cdots & & g_{mm}(s) \end{bmatrix}$$

Xét độ nhạy giữa biến vào u_j và biến ra y_i của một vòng điều chỉnh với hai trường hợp:

- Không có các đầu vào khác, tức $u_k = 0, \forall k \neq j$

$$\left. \frac{\partial y_i}{\partial u_j} \right|_{u_k=0, k \neq j} = g_{ij} \triangleq [G]_{ij}$$

- Có các đầu vào khác sao cho các đầu ra khác được giữ cố định, tức

$$y_k = 0, \forall k \neq i \quad \Rightarrow \quad \left. \frac{\partial y_i}{\partial u_j} \right|_{y_k=0, k \neq i} = \hat{g}_{ij} \triangleq 1 / [G^{-1}]_{ji}$$

Hệ số tỉ lệ giữa hai giá trị thể hiện mức độ liên kết giữa u_j và y_i :

$$\lambda_{ij} \triangleq g_{ij} / \hat{g}_{ij} = [G]_{ij} [G^{-1}]_{ji} \Rightarrow \Lambda(G) = G \times (G^{-1})^T \quad (3.18)$$

Một số tính chất của ma trận RGA

- Tổng các phần tử của một hàng hoặc một cột = 1

$$\sum_i \lambda_{ij} = \sum_j \lambda_{ij} = 1.0$$

- Ma trận RGA không phụ thuộc vào việc chỉnh thang (chuẩn hóa mô hình):

$$\Lambda(G) = \Lambda(D_1 G D_2), \quad \forall D_1 = \text{diag}(d_{1i}), D_2 = \text{diag}(d_{2i})$$

- Hoán đổi hai hàng (hai cột) của G dẫn tới hoán đổi hai hàng (hai cột) của $\Lambda(G)$
- $\Lambda(G)$ là một ma trận đơn vị nếu G là ma trận tam giác trên hoặc dưới (tương tác một chiều)
- $G(s)$ là một ma trận hàm truyền thì $\Lambda(G(j\omega))$ được tính toán tương ứng với từng tần số ω trong dải tần quan tâm
- Số RGA $\triangleq \|\Lambda(G) - I\|_{\text{sum}} = \sum_{i \neq j} |g_{ij}|$ là một chỉ số cho mức độ tương tác của quá trình (quan trọng nhất là xung quanh tần số cắt)

Phương pháp cặp đôi vào/ra dựa trên RGA

- Luật 1: Cặp đôi vào/ra (j,i) tương ứng với phần tử λ_{ij} có giá trị gần 1 xung quanh tần số cắt mong muốn của hệ kín, ưu tiên số lớn hơn 1
 - Dải tần mà $\lambda_{ij} \approx 1$ càng rộng càng tốt
 - Trong trường hợp đơn giản có thể chọn hàm truyền ở trạng thái xác lập ($s=0$)
- Luật 2: Tránh chọn $\lambda_{ij} \ll 1$ hoặc $\lambda_{ij} < 0$ cho hệ ở trạng thái xác lập

Ví dụ 1:

$$\Lambda = \begin{matrix} & \begin{matrix} u_1 & u_2 & u_3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1.98 & 1.04 & -2.02 \\ -0.36 & 1.10 & 0.26 \\ -0.62 & -1.14 & 2.76 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Ví dụ 2:

$$\Lambda = \begin{matrix} & \begin{matrix} u_1 & u_2 & u_3 & u_4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.931 & 0.150 & 0.080 & -0.164 \\ -0.011 & -0.429 & 0.286 & 1.154 \\ -0.135 & 3.314 & -0.270 & -1.910 \\ 0.215 & -2.030 & 0.900 & 1.919 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Tính ổn định của hệ điều khiển phi tập trung

Với quá trình $G(s)$ ổn định

1. Nếu mỗi vòng đơn ổn định khi các vòng khác hở mạch và ma trận $\Lambda(G) = I \forall \omega$ thì toàn hệ cũng ổn định \Rightarrow Chọn cặp đôi sao cho $\Lambda(G) \approx I$ xung quanh tần số cắt
2. Nếu các bộ điều khiển sử dụng tác động tích phân và cặp đôi tương ứng với phần tử của $\Lambda(G(0))$ có giá trị âm thì:
 - Toàn hệ mất ổn định, hoặc
 - Vòng đơn tương ứng mất ổn định, hoặc
 - Toàn hệ mất ổn định khi vòng đơn tương ứng hở mạch
3. Nếu bộ điều khiển phản hồi i sử dụng tác động tích phân và ổn định khi các vòng khác hở mạch, và chỉ số Niederlinski

$$NI = \frac{\det G(0)}{\prod_{i=1}^n g_{ii}(0)} < 0 \quad (3.22)$$

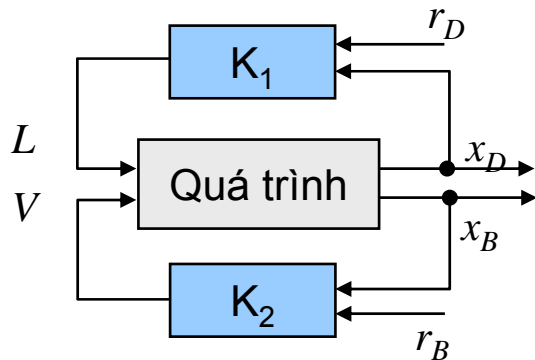
thì vòng điều khiển i đó sẽ mất ổn định. Với $n=2$ thì điều kiện trên là cần và đủ.

Xét tính ổn định: ví dụ tháp chưng cất

- Mô hình tĩnh (trạng thái xác lập)

$$\begin{bmatrix} x_D \\ x_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 12,8 & -18,9 \\ 6,6 & -19,4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ V \end{bmatrix}$$

$$\Lambda \approx \begin{bmatrix} 2,01 & -1,01 \\ -1,01 & 2,01 \end{bmatrix}$$

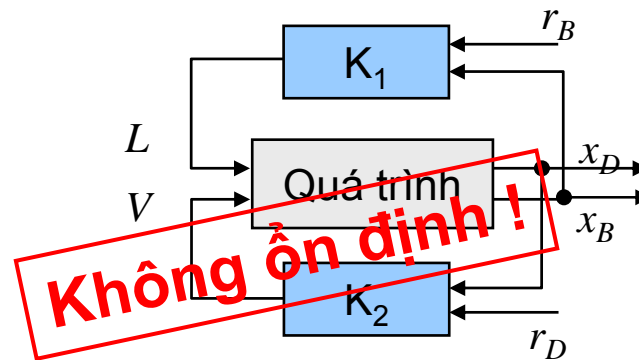


$$NI = \frac{\det G(0)}{\prod_{i=1}^2 g_{ii}(0)}$$

$$= \frac{-12,8 \cdot 19,4 + 18,9 \cdot 6,6}{-12,8 \cdot 19,4} = 0,498$$

$$\begin{bmatrix} x_D \\ x_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -18,9 & 12,8 \\ -19,4 & 6,6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ L \end{bmatrix}$$

$$\Lambda \approx \begin{bmatrix} -1,01 & 2,01 \\ 2,01 & -1,01 \end{bmatrix}$$



$$NI = \frac{\det G(0)}{\prod_{i=1}^2 g_{ii}(0)}$$

$$= \frac{-18,9 \cdot 6,6 + 12,8 \cdot 19,4}{-18,9 \cdot 6,6} = -0,991$$

3.9.2 Phép phân tích giá trị suy biến (SVD)

- Giá trị suy biến (*singular value*) và phép phân tích giá trị suy biến (*singular value decomposition*) có rất nhiều công dụng trong phân tích chất lượng của hệ thống
- Trong điều khiển quá trình, bên cạnh phân tích RGA, phép phân tích giá trị suy biến là một công cụ hữu hiệu phục vụ:
 - Lựa chọn các biến cần điều khiển, các biến được điều khiển và các biến điều khiển
 - Đánh giá tính bền vững của một sách lược/cấu trúc điều khiển
 - Xác định cấu hình điều khiển phi tập trung tốt nhất

Các giá trị suy biến

- Các giá trị suy biến σ của một ma trận số phức A ($m \times n$) được định nghĩa là các giá trị riêng của $A^H A \Rightarrow$ thước đo khoảng cách gần hay xa với "sự suy biến" của A

Xét chuẩn bậc 2 của A :

$$\|A\|_2 = \max_i \sqrt{\lambda_i(A^H A)} = \max_i \sigma_i(A) \triangleq \bar{\sigma}(A) \quad (3.24)$$

$$\bar{\sigma}(A) = \max_{x \neq 0} \frac{\|Ax\|_2}{\|x\|_2} = \max_{\|x\|_2=1} \|Ax\|_2 \quad (3.25)$$

$$\underline{\sigma}(A) = \min_{x \neq 0} \frac{\|Ax\|_2}{\|x\|_2} = \min_{\|x\|_2=1} \|Ax\|_2 \quad (3.26)$$

- Diễn giải ý nghĩa:
 - Với vector đầu vào x , ma trận A ánh xạ sang $y = Ax$ với hệ số khuếch đại lớn nhất là $\bar{\sigma}$ và hệ số khuếch đại nhỏ nhất là $\underline{\sigma}$
 - Hệ số khuếch đại phụ thuộc vào *chiều của vector x*

$$\bar{\sigma} / \underline{\sigma}$$

Phép phân tích SVD và sự phụ thuộc chiều

- Phép phân tích SVD

$$A = U\Sigma V^T = U \begin{bmatrix} \sigma_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \sigma_k \end{bmatrix} V^T, \quad U^T U = I, \quad V^T V = I \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} = \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_k = \underline{\sigma}, \quad k = \min(m, n) \\ \Rightarrow AV = U\Sigma, \quad Av_1 = \bar{\sigma}u_1, \quad Av_k = \underline{\sigma}u_k \end{aligned} \quad (3.28)$$

- Nhìn từ lý thuyết hệ thống, nếu coi $G(j\omega)$ là ma trận A và x là vector tín hiệu vào ta sẽ có thể đưa ra một số diễn giải tương tự và đi sâu hơn:
 - Các vector đầu vào x có chiều trùng với cột đầu tiên của V sẽ được khuếch đại nhiều nhất \Rightarrow kết quả là vector y có chiều trùng với cột đầu của U
 - Các vector đầu vào x có chiều trùng với cột cuối của V sẽ được khuếch đại ít nhất \Rightarrow kết quả là vector y có chiều trùng với cột cuối của U

Lựa chọn biến được điều khiển

- Ví dụ: chọn nhiệt độ khay nào trong tháp chưng cất làm biến được điều khiển? (các biến điều khiển là lưu lượng hồi lưu L và công suất nhiệt cấp Q)
- Theo chỉ dẫn từ chương 2: Lựa chọn biến đầu ra chịu ảnh hưởng mạnh nhất dưới tác động của biến điều khiển => tương ứng với phần tử có giá trị lớn nhất trong mỗi cột của U

Khay $\Delta T/\Delta L$ $\Delta T/\Delta Q$

9	-0.00773271	0.0134723
8	-0.2399404	0.2378752
7	-2.5041590	2.4223120
6	-5.9972530	5.7837800
5	-1.6773120	1.6581630
4	0.0217166	0.0259478
3	0.1976678	-0.1586702
2	0.1289912	-0.1068900
1	0.0646059	-0.0538632

$$U = \begin{bmatrix} -0.0015968 & -0.0828981 \\ -0.0361514 & -0.0835548 \\ -0.3728142 & -0.0391486 \\ -0.8915611 & 0.1473784 \\ -0.2523673 & -0.6482796 \\ -0.0002581 & -0.6482796 \\ 0.0270092 & -0.4463671 \\ 0.0178741 & -0.2450451 \\ 0.0089766 & -0.1182182 \end{bmatrix}$$

$$V^T = \begin{bmatrix} 0.7191691 & -0.6948426 \\ -0.6948426 & -0.7191691 \end{bmatrix}$$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} 9.3452 & 0 \\ 0 & 0.052061 \end{bmatrix}$$

Khay thứ 6

Số điều kiện (condition number)

- Số điều kiện (*condition number*):

$$\text{cond}(A) = \gamma(A) = \bar{\sigma} / \underline{\sigma} \quad (3.29)$$

- Trong đại số tuyến tính, $\text{cond}(A)$ nói lên "sự nhạy cảm" của hệ với sai số trong A hoặc trong y , tức khả năng tìm nghiệm $Ax = b$ một cách chính xác, $\text{cond}(A)$ càng lớn càng bất lợi.

Ví dụ:

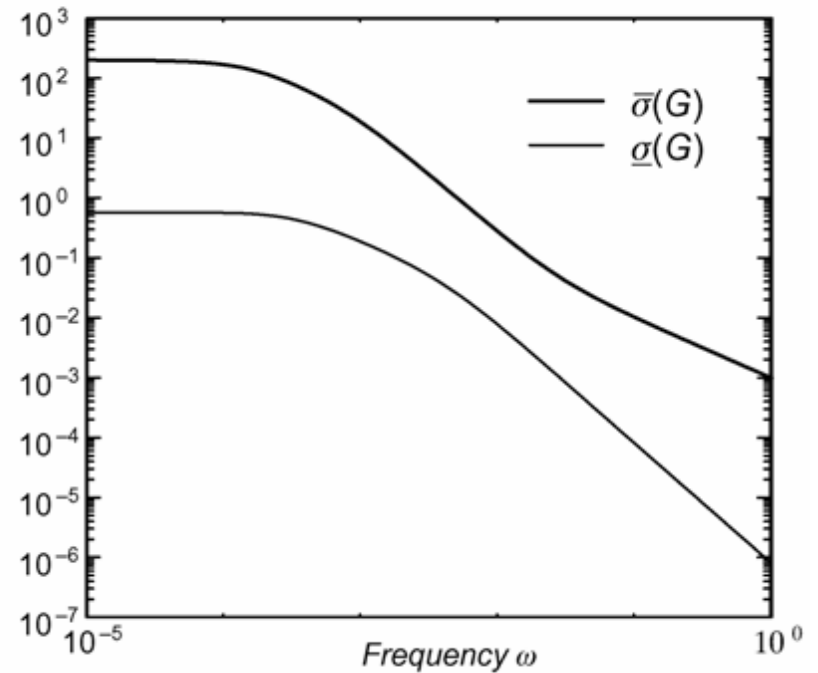
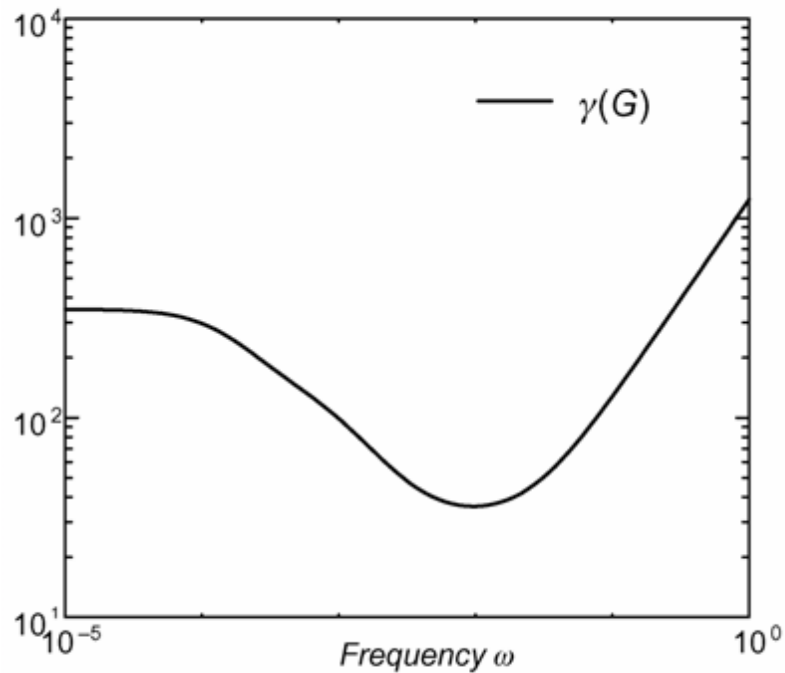
$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 10 & 1 \end{bmatrix} \quad \Sigma(A) = \begin{bmatrix} 10.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}, \quad \text{cond}(A) = 101$$

Nếu A_{12} thay đổi từ 0 sang 0.1 sẽ dẫn tới A suy biến

- Trong lý thuyết hệ thống, $\text{cond}(G(j\omega))$ liên quan nhiều tới khả năng điều khiển, giới hạn chất lượng điều khiển
 - Số điều kiện càng lớn thì hệ càng nhạy cảm với sai lệch tham số mô hình
 - Số điều kiện liên quan tới các chỉ tiêu chất lượng (miền tần số) có thể đạt được
 - Số điều kiện có phụ thuộc vào cách chỉnh thang/chuẩn hóa mô hình!

Lưu ý: Sự phụ thuộc tần số

Ví dụ: Mô hình tháp chưng cất hai sản phẩm



Loại bớt số biến vào/ra

- Dựa theo (Seborg et. al., 2000):
 - Sau khi chuẩn hóa mô hình, phân tích SVD và sắp xếp các giá trị suy biến theo thứ tự nhỏ dần, có thể loại bớt một số đầu vào/ra nếu $\sigma_{i+1} < \sigma_i / 10$

- Ví dụ:

$$G(0) = \begin{bmatrix} 0.48 & 0.90 & -0.006 \\ 0.52 & 0.95 & 0.008 \\ 0.90 & -0.95 & 0.020 \end{bmatrix}$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} -2.4376 & 3.0241 & 0.4135 \\ 1.2211 & -0.7617 & 0.5407 \\ 2.2165 & -1.2623 & 0.0458 \end{bmatrix}$$

$$U = \begin{bmatrix} 0.5714 & 0.3766 & 0.7292 \\ 0.6035 & 0.4093 & -0.6843 \\ -0.5561 & 0.8311 & 0.0066 \end{bmatrix}$$

$$V = \begin{bmatrix} 0.0541 & 0.9984 & 0.0151 \\ 0.9985 & -0.0540 & -0.0068 \\ -0.0060 & 0.0154 & -0.9999 \end{bmatrix}$$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} 1.618 & 0 & 0 \\ 0 & 1.143 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0097 \end{bmatrix}$$

=> Có thể cân nhắc loại bớt một cặp vào/ra (u_3 và y_1 hoặc y_2)