

# SCAMBIATORI - ES

①

- ESEMPIO : SCAMBIATORE A LIQUIDO

- Dati del problema:

• Fascio di  $N=100$  tubi, diametro  $D=1$  cm, spessore  $s=1$  mm, lunghezza  $L=1$  m

• Temperature nominali  $T_i = 40^\circ\text{C}$   $T_e = 100^\circ\text{C}$

• Portata nominale  $w = 0.1$  kg/s

• Coefficienti di scambio  $\gamma_e = 100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$   $\gamma_i = 2000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$

• Caratteristiche fluido  $\rho = 1000$  kg/m<sup>3</sup>  $c = 4200 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$

• Caratteristiche metallo  $\rho_m = 7800$  kg/m<sup>3</sup>  $c_m = 600 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$

- Obiettivo del controllo: regolare la temperatura d'uscita agendo sulla temperatura d'ingresso

- Calcolo di parametri

• Consideriamo gli  $N$  tubi in parallelo come un unico tubo equivalente, avente

$$w_i = N \cdot \pi \cdot D$$

$$w_e = N \cdot \pi \cdot (D + 2s)$$

$$A = N \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$A_m = N \pi \left(\frac{D}{2} + s\right)^2 - A$$

## SCAMBiatori - ES

(2)

• A conti fatti risulta

$$\alpha_0 = \frac{Y_T}{WC} = 0.84$$

$$\alpha_i = \frac{Y_{im}}{WC} = 15$$

$$\tilde{\tau} = \frac{\tau}{W} = 78.5$$

$$\tilde{\tau}' = \frac{\tau'_{mcm}}{WC} = 38.5$$

- calcolo del regime nominale

$$T = e^{-\alpha_0} T_i + (1 - e^{-\alpha_0}) T_e \quad M_0 = e^{-\alpha_0} = 0.43$$

$$= 0.43 \cdot 40^\circ + 0.57 \cdot 100^\circ = 74^\circ\text{C}$$

- Fdt del processo

$$\frac{\Delta T_u}{\Delta T_i} = G_{Ti}(s) = e^{-s\tilde{\tau}} \cdot M_0 \cdot e^{-\frac{s\tilde{\tau}'}{1+s\frac{\tau'}{\alpha_i}}}, \quad M_0 = e^{-\alpha_0}$$

approssimazioni

$$G_{Tip}(s) \approx e^{-s\tilde{\tau}} \cdot \frac{M_0}{(1+sT)^n}$$

$$n = \frac{\alpha_i}{2} = 7$$

$$T = \frac{\tilde{\tau}'}{n} = 5.50$$

$$G_{Ti, \tau}(s) \approx M_0 \cdot e^{-s(\tilde{\tau} + \tau')}$$

(valida per  $\omega \ll \frac{\alpha_i}{\tilde{\tau}'} = 0.79 \text{ rad/s}$ )

- Variazioni di  $G_{Ti}(s)$  rispetto a  $\omega$ :

$\tilde{\tau}$ ,  $\tilde{\tau}'$  sono inversamente proporzionali alla portata

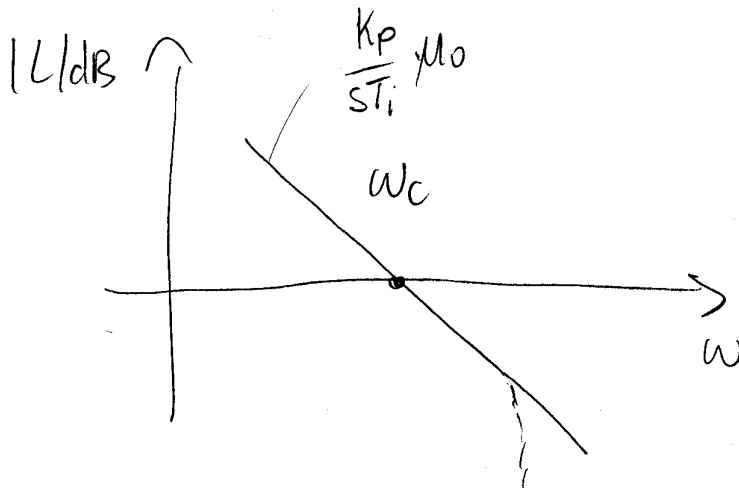
$M_0$  aumenta all'aumentare della portata

## SCAMBIATORI - ES

(3)

- Alle frequenze di interesse per il controllo, la dinamica è essenzialmente un ritardo puro; possiamo fare un regolatore I con la banda max ottenibile a fronte di  $\phi_m = 40^\circ$  (ad es.)

$$R(s) = k_p \frac{1}{sT_i}$$



$$L(s) \approx \frac{k_p}{sT_i} M_0 e^{-s(\tau+\tau')}$$

$$\phi_m = 180^\circ - |\phi_c| = 180^\circ + \phi_c = 90^\circ - \frac{180^\circ}{\pi} \omega_c (\tau + \tau') = 40^\circ$$

$$\omega_c = \frac{50^\circ}{180^\circ} \pi \frac{1}{(\tau + \tau')} = 0.0075 \text{ rad/s} \quad \frac{1}{\omega_c} = 134 \text{ s}$$

$$\omega_c = \frac{k_p}{T_i} \cdot M_0 \Rightarrow \frac{k_p}{T_i} = \frac{\omega_c}{M_0} = 0.032$$

- Si può migliorare leggermente il margine di fase aggiungendo un po' di azione proporzionale; occorre però piazzare lo zero ben oltre  $\omega_c$  per evitare che piccole variazioni del guadagno portino a grandi variazioni della banda (e quindi del margine di fase)

# SCAMBIATORI - ES

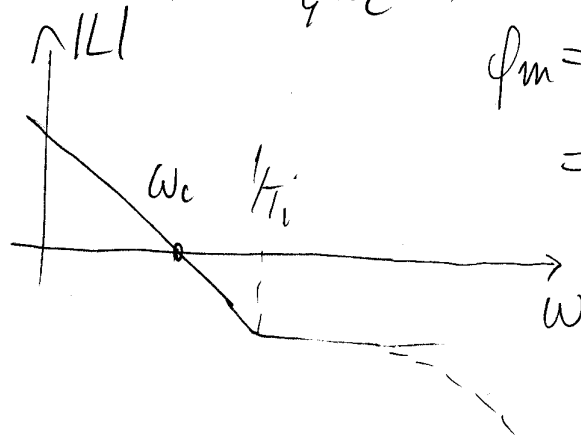
(4)

- Ad es. si può porre  $T_i = \frac{1}{\zeta \omega_c}$ ;  $\omega_c$  resta invariata

$$\phi_m = 40^\circ + \arctan(\omega_c T_i) = 40^\circ + \arctan(0.25) = 54^\circ$$

$$T_i = \frac{1}{\zeta \omega_c} = 335$$

$$K_p = \frac{\omega_c T_i}{M_0} = 1.36$$



- Nota (1): Gain scheduling

Nell'ipotesi che durante il funzionamento la portata  $w$  possa variare in modo significativo (ma lento), si può pensare di adattare i parametri del PI. Supponiamo che  $w$  possa ridursi rispetto alla portata nominale  $w_0$ , e cerchiamo di mantenere sempre la banda max possibile

$$\omega_c = \frac{50^\circ}{180^\circ} \pi \frac{1}{\zeta + \zeta'} = \frac{50^\circ}{180^\circ} \pi \frac{\omega_c}{M_c + M_{cm}} \cdot \frac{w_0 c}{w_0 c} =$$

$$= w_0^0 \cdot \frac{w}{w_0}$$

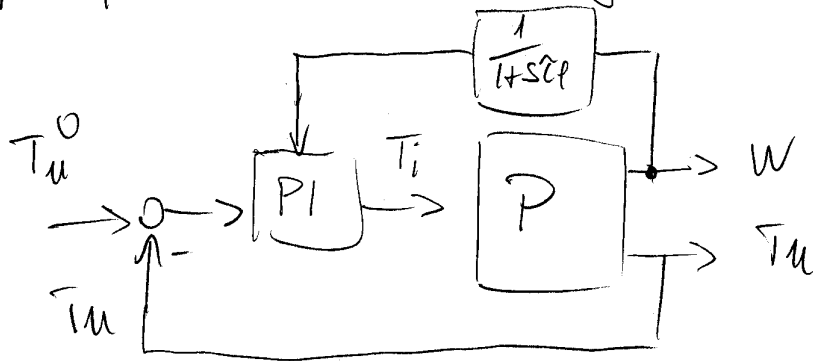
$$T_i = \frac{1}{\zeta \omega_c} = \frac{1}{\zeta \omega_c^0} \frac{w_0}{w} = T_i^0 \cdot \frac{w_0}{w}$$

$$K_p = \frac{\omega_c T_i}{M_0} = \frac{0.25}{e^{-\alpha_0}} = 0.25 e^{\frac{K_T}{\omega_c} \frac{w_0 c}{w_0 c}} = (K_p^0)^{w_0/w}$$

## SCAMBIATORI - ES

(5)

- Si può quindi realizzare un regolatore PI gain-scheduling

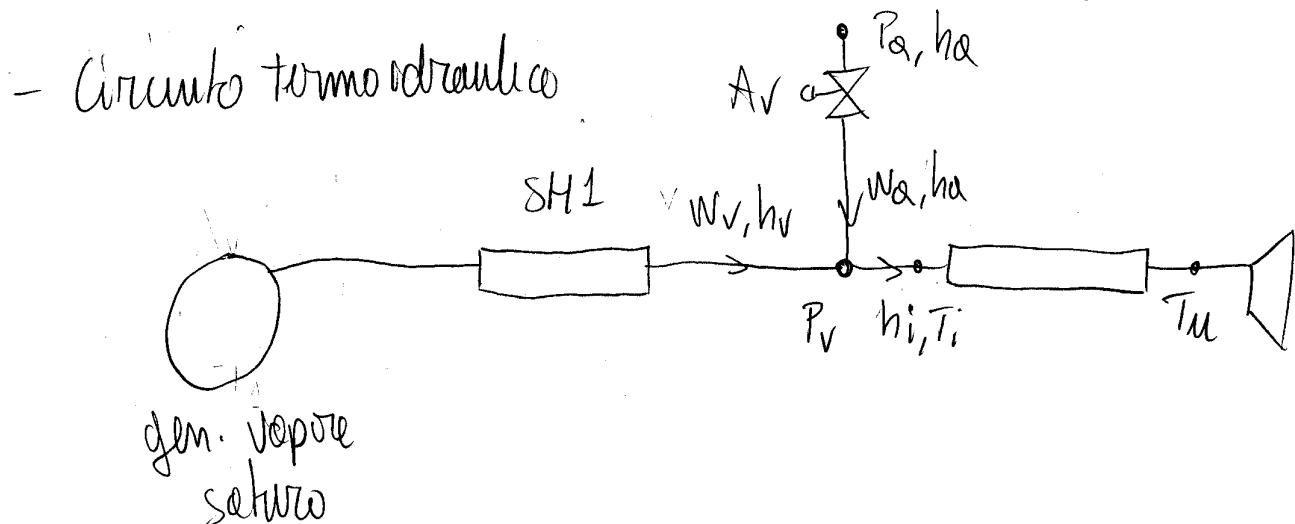


il filtro passa-basso serve ad eliminare le componenti in alta frequenza della portata (x es dovute al rumore di misura)

- In teoria dovrebbe essere  $\tau_f \gg \frac{1}{\omega_c}$ , in modo che la dinamica di adattamento di parametri sia più lenta della dinamica ad anello chiuso. In pratica, può essere sufficiente una costante di tempo più piccola - occorre poi verificare il buon funzionamento del sistema p.es tramite simulazione

## - ESEMPIO 2: SURRISCALDATORE VAPORE

- I surriscaldatori elevano la temperatura del vapore saturo di una caldaia per migliorare il rendimento termodinamico della turbina a vapore
- la temperatura d'uscita deve essere regolata perché non superi il limite massimo di resistenza del materiale.
- la regolazione avviene intervenendo sulla temperatura d'ingresso  $T_i$ , modulata tramite l'iniezione di una piccola portata di acqua liquida (abtemperamento)
- Ipotesi modellistiche semplificative
  - trascuriamo gli effetti di comprimibilità del vapore
  - assumiamo uniforme la temperatura esterna (fumi caldi)

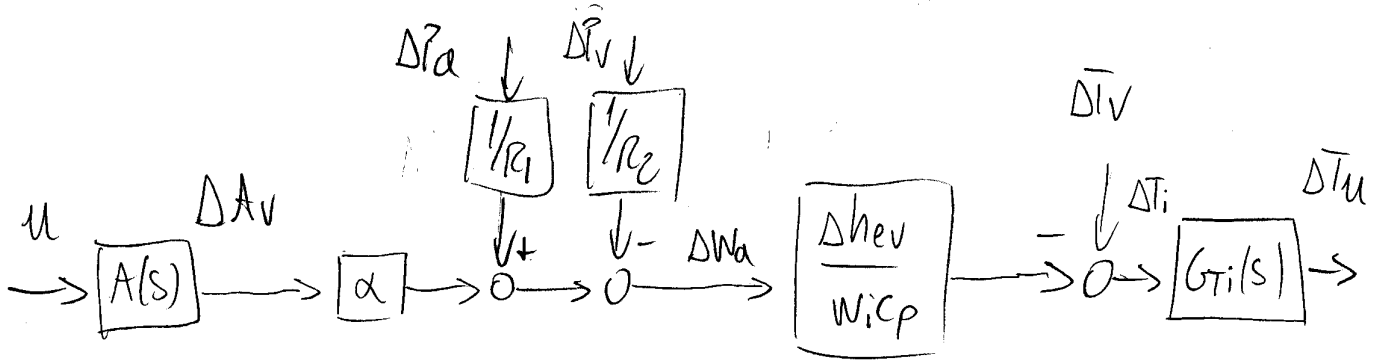




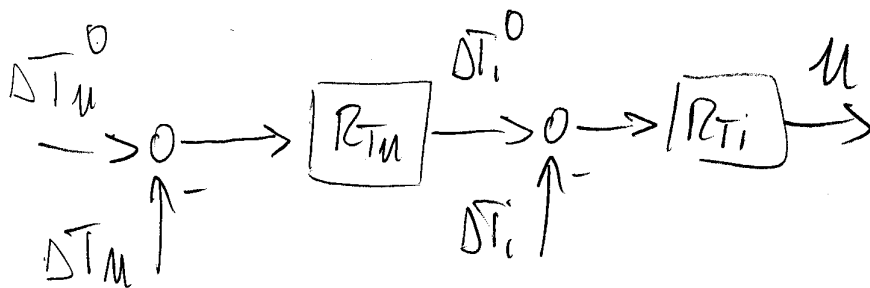
# SCAMBiatori - ES

(8)

- Possiamo riassumere la situazione nel seguente schema:



- Come si vede, parecchi disturbi entrano a monte di  $G_{Ti}(s)$ , che limita fortemente la banda di regolazione. Per migliorare l'attenuazione di questi disturbi, è opportuno introdurre una regolazione in cascata di  $\Delta T_i$ , che non pone problemi particolari (l'unica dinamica è quella dell'attuatore e della termocoppia). Successivamente si progetterà la regolazione di  $\Delta T_u$  agendo sul set-point di  $\Delta T_i$ , coinvolgendo quindi la sola  $G_{Ti}(s)$





## SCAMBIATORI - ES

(9)

- Dati numerici d'esempio

$$W = 70 \text{ kg/s}$$

$$T_i = 742 \text{ K}$$

$$T_u = 823 \text{ K}$$

$$T_e = 884 \text{ K}$$

$$c_p = 2700 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$$

$$c_m = 688 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$$

$$\rho = 27 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_m = 7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$D_i = 24.8 \text{ mm}$$

$$s = 7 \text{ mm}$$

$$L = 4.7 \text{ m}$$

$$N = 288$$

$$j_e = 100 \quad j_i = 2000$$

- Hp modellistiche

- trascuriamo gli effetti della comprimibilità

- assumiamo  $w = \text{cost}$  (trascuriamo  $w_a$  e supponiamo che le altre variabili di processo non cambino troppo)

- Si ottiene

$$\tau = 1 \text{ s}$$

$$\tau' = 107 \text{ s}$$

$$\alpha_0 = 0.88$$

$$\alpha_i = 8.9$$

$$M_0 = e^{-\alpha_0} = 0.41$$

$$G_{Ti}(s) = e^{-s\tau} \cdot M_0 \cdot e^{\frac{-s\tau'}{1+s\tau'/\alpha_i}}$$

$$\approx M_0 \cdot e^{\frac{-s\tau'}{1+s\tau'/\alpha_i}}$$

$$M_0 \frac{1}{(1+s\tau')^n}$$

$$M_0 e^{-s\tau'}$$

$$n = \frac{\alpha_i}{\tau} = 4$$

$$T = \frac{\tau'}{n} = 27 \text{ s}$$