

SCAMBIATORI - ES

①

- ESEMPIO : SCAMBIATORE A LIQUIDO

- Dati del problema:

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

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

• Portata nominale $w = 0.1\text{ kg/s}$

• 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 $\rho = 1000\text{ kg/m}^3$ $c = 4200\frac{\text{J}}{\text{kgK}}$

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

- 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 ω :

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

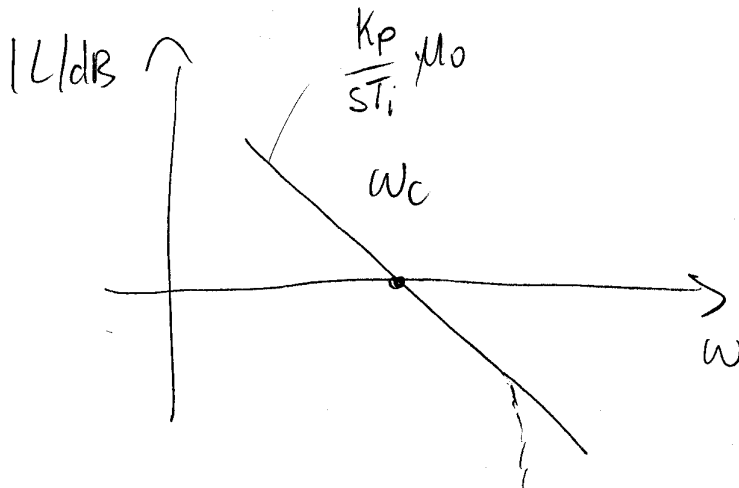
M_0 aumenta all'aumentare della portata

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 ω_c per evitare che piccole variazioni del guadagno portino a grandi variazioni della banda (e quindi del margine di fase)

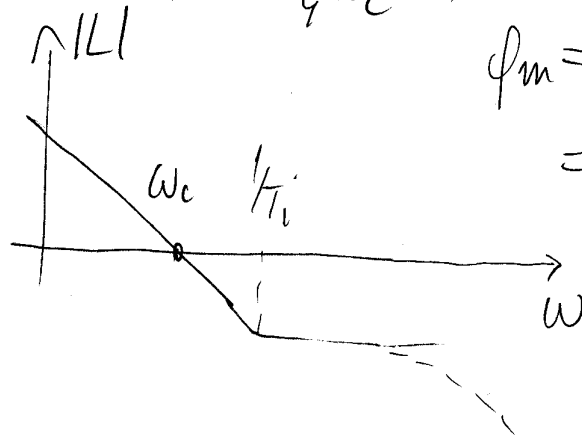
SCAMBIATORI - ES

(4)

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

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

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



$$\begin{aligned} \phi_m &= 40^\circ + \arctan(\omega_c T_i) = \\ &= 40^\circ + \arctan(0.25) = 54^\circ \end{aligned}$$

- 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

$$\begin{aligned} \omega_c &= \frac{50^\circ}{180^\circ} \pi \frac{1}{\zeta + \zeta'} = \frac{50^\circ}{180^\circ} \pi \frac{\omega_c}{M_c + M_{cm}} \cdot \frac{w_0 c}{w_0 c} = \\ &= w_0^0 \cdot \frac{w}{w_0} \end{aligned}$$

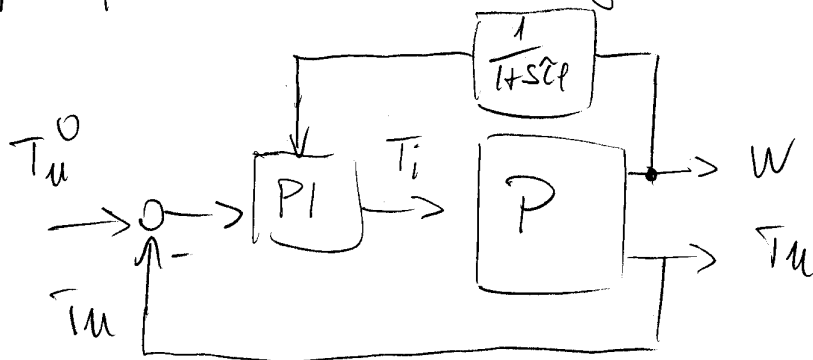
$$T_i = \frac{1}{\zeta \omega_c} = \frac{1}{\zeta \omega_c^0} \frac{w_0}{w} = T_i^0 \cdot \frac{w_0}{w}$$

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

SCAMBIATORI - ES

(5)

- Si può quindi realizzare un regolatore PI gain-scheduling

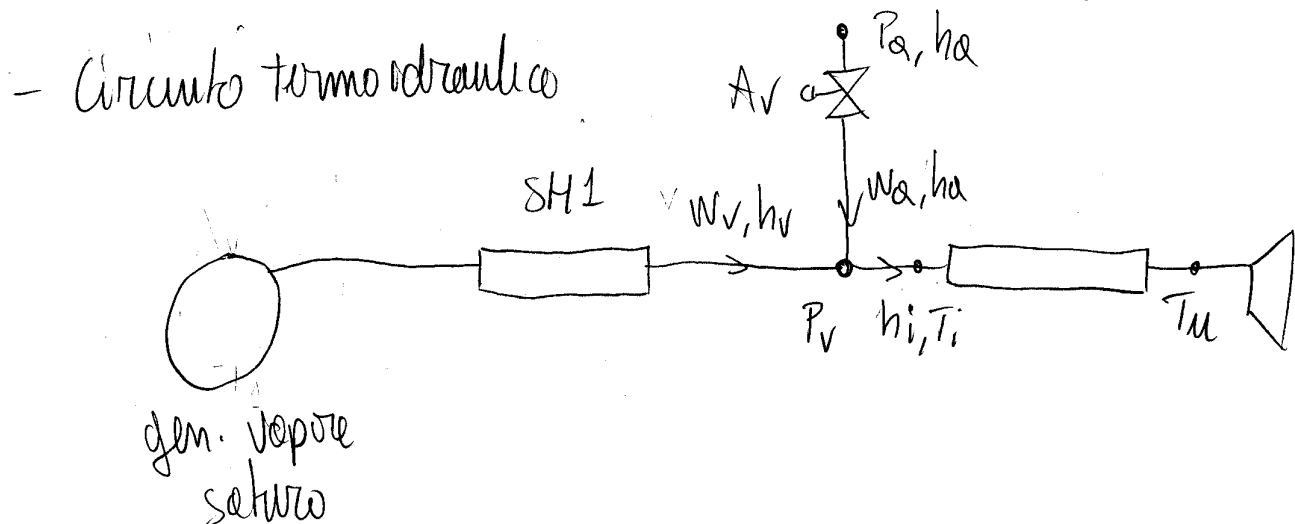


il filtro passa-basso serve ad eliminare le componenti in alta frequenza della portata (x es dovute al rumore di misura)

- 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

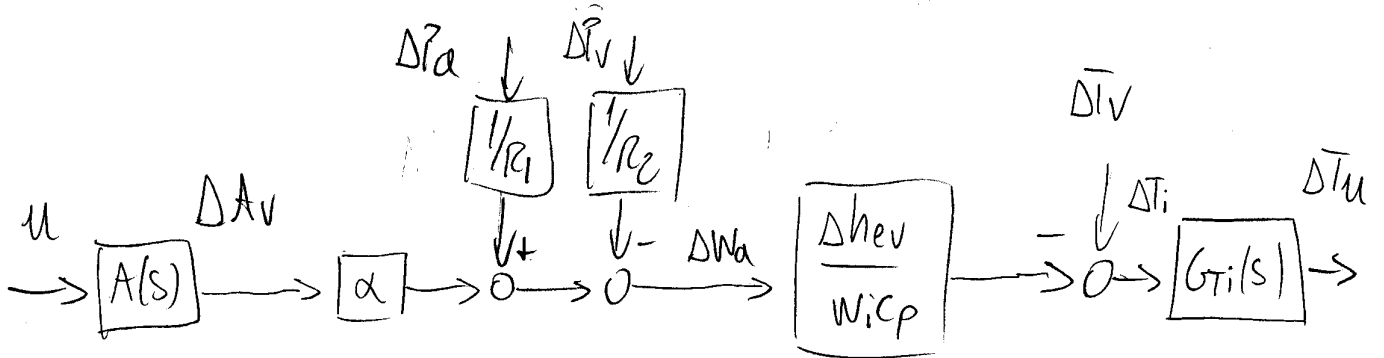
- I surriscaldatori elevano la temperatura del vapore saturo di una caldaia per migliorare il rendimento termodinamico della turbina a vapore
- La temperatura d'uscita deve essere regolata perché non superi il limite massimo di resistenza del materiale.
- La regolazione avviene intervenendo sulla temperatura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



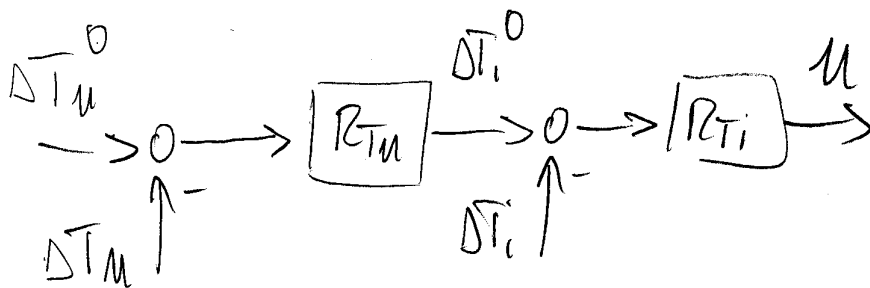
SCAMBiatori - ES

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 ΔT_i , che non pone problemi particolari (l'unica dinamica è quella dell'attuatore e della termocoppia). Successivamente si progetterà la regolazione di ΔTu agganciando sul set-point di ΔT_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

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

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

$$\alpha_0 = 0.88$$

$$\alpha_i = 8.9$$

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

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

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

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

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

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

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