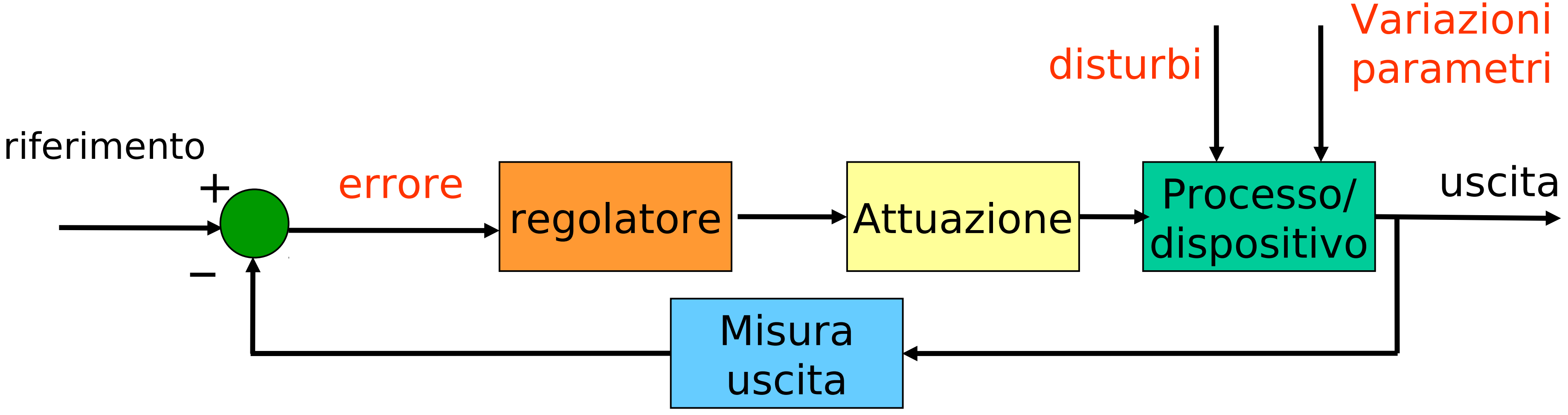
Regolatori Industriali:

Regolatori Industriali: strutture di controllo particolarmente semplici e largamente utilizzate nell'ambito dell'automazione industriale. Struttura di controllo predefinita dove il progettista deve scegliere alcuni valori eseguendo esperimenti sull'impianto.

Accettano il segnale d'errore come ingresso e generano un'uscita per pilotare il processo/dispositivo ad uno stato desiderato



Regolatori industriali:

- Regolatori on-off (Controllo logico o discreto realizzato con PLC)
  - Completamente acceso o completamente spento (esempio: controllo della temperatura ambientale tramite termostati)

- Regolatori analogici (Controllo continuo)
  - Rispetto ad un regolatore on-off che è completamente acceso o completamente spento, un controllore analogico è in grado di fornire un’uscita che varia gradualmente (esempio: controllo velocità di rotazione di un motore)

- Regolatori digitali:
  - Implementazione digitale dei controllori analogici (microprocessore)

Alcune tipologie di regolatori analogici:

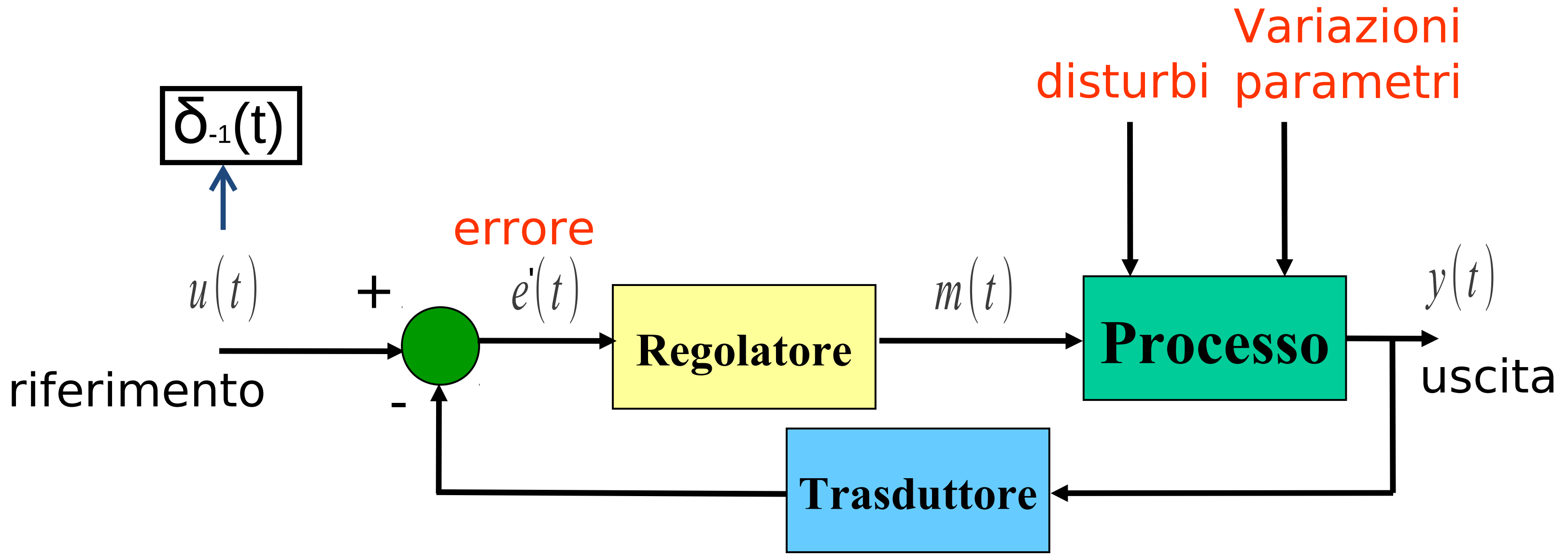
- Controllo proporzionale (P)
- Controllo integrale (I)
- Controllo derivativo (D)
- Controllo proporzionale integrale e derivativo (PID)

Studio delle diverse modalità di controllo tramite:

- Funzione di trasferimento
- Risposta nel tempo
- Risposta in frequenza

Regolatori analogici : $G(s)$

elementari: P, I, D, relative combinazioni, PID



Il modello del processo non è noto. Si suppone che sia stabile esternamente (in particolare, si suppone che non siano presenti poli nell'origine).

il Processo

Controllore proporzionale (P)

Uscita direttamente proporzionale all'ingresso

Equazione nel dominio del tempo

$$m(t) = \underbrace{K_G}_{G\,=\,K_G}\, e'(t)$$

Funzione di trasferimento

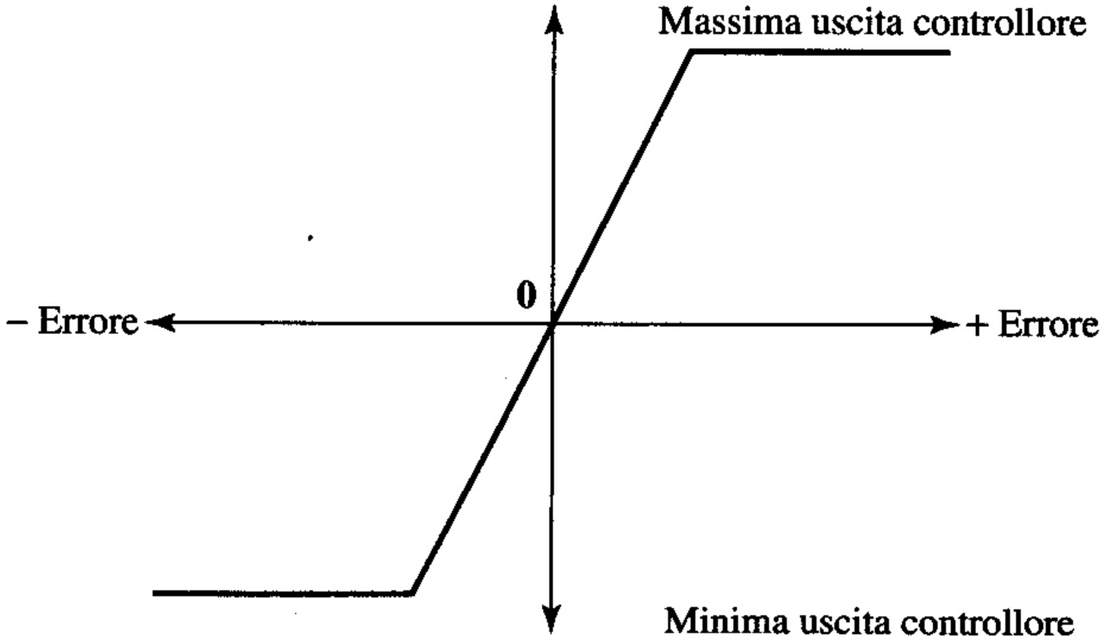
$$G(s) = \frac{M(s)}{E'(s)} = K_G$$

K_G = guadagno del termine proporzionale

Risposta nel tempo

Controllore proporzionale:

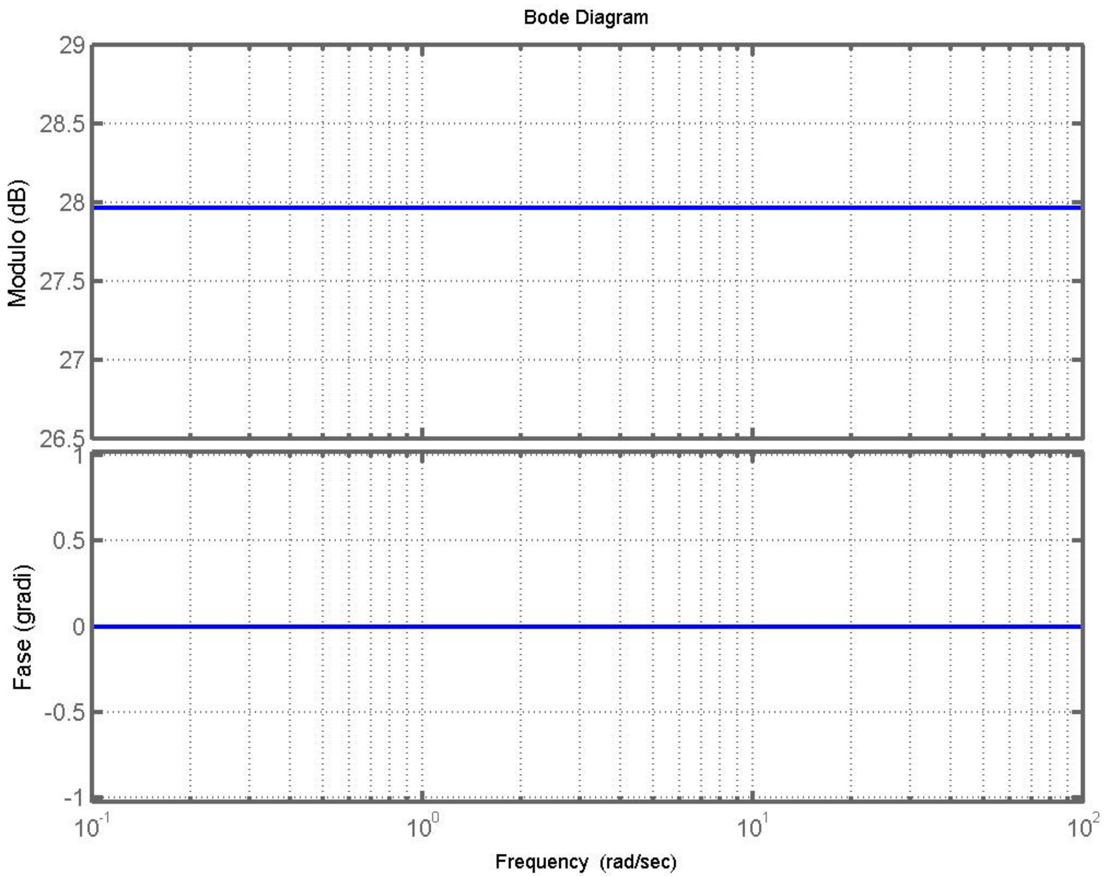
caratteristiche ingresso/uscita con la saturazione dovuta ai limiti fisici dei dispositivi che si controllano (movimento delle unità meccaniche, idrauliche e pneumatiche; tensioni di saturazione nei controllori elettronici)



Risposta in frequenza

Controllore proporzionale: amplificatore ideale

- Modulo: retta orizzontale ad un valore di 20 log (K_G)
- Fase: retta orizzontale a un valore di zero gradi



Esempio:

- Modulo: 20 log(25)= 27.96 dB
- Fase: 0 gradi

Con questo controllore P, avendo assunto che il processo non ha poli nell'origine, il sistema a ciclo chiuso è di tipo 0, pertanto con un ingresso a gradino l'errore non sarà mai nullo ma finito:

$$\tilde{e}_0 = W_e(s)\big|_{s=0} = \frac{k_d^2}{k_d + K_F} \qquad K_F = K_G K_P$$

Nota: aumentando il guadagno del controllore l'errore diminuisce quindi la prestazione di regime "migliora"; **Attenzione:** l'aumento del guadagno può rendere il sistema **instabile !!!**

Controllore integrale (I)

Uscita proporzionale all’area sottesa dalla curva errore-tempo (storia passata della curva errore-tempo)

Equazione nel dominio del tempo

$$m(t) = K_I \int_0^t e'(\tau)\, d\tau$$

Funzione di trasferimento

$$G(s) = \frac{M(s)}{E'(s)} = \frac{K_I}{s}$$

Condizioni iniziali nulle

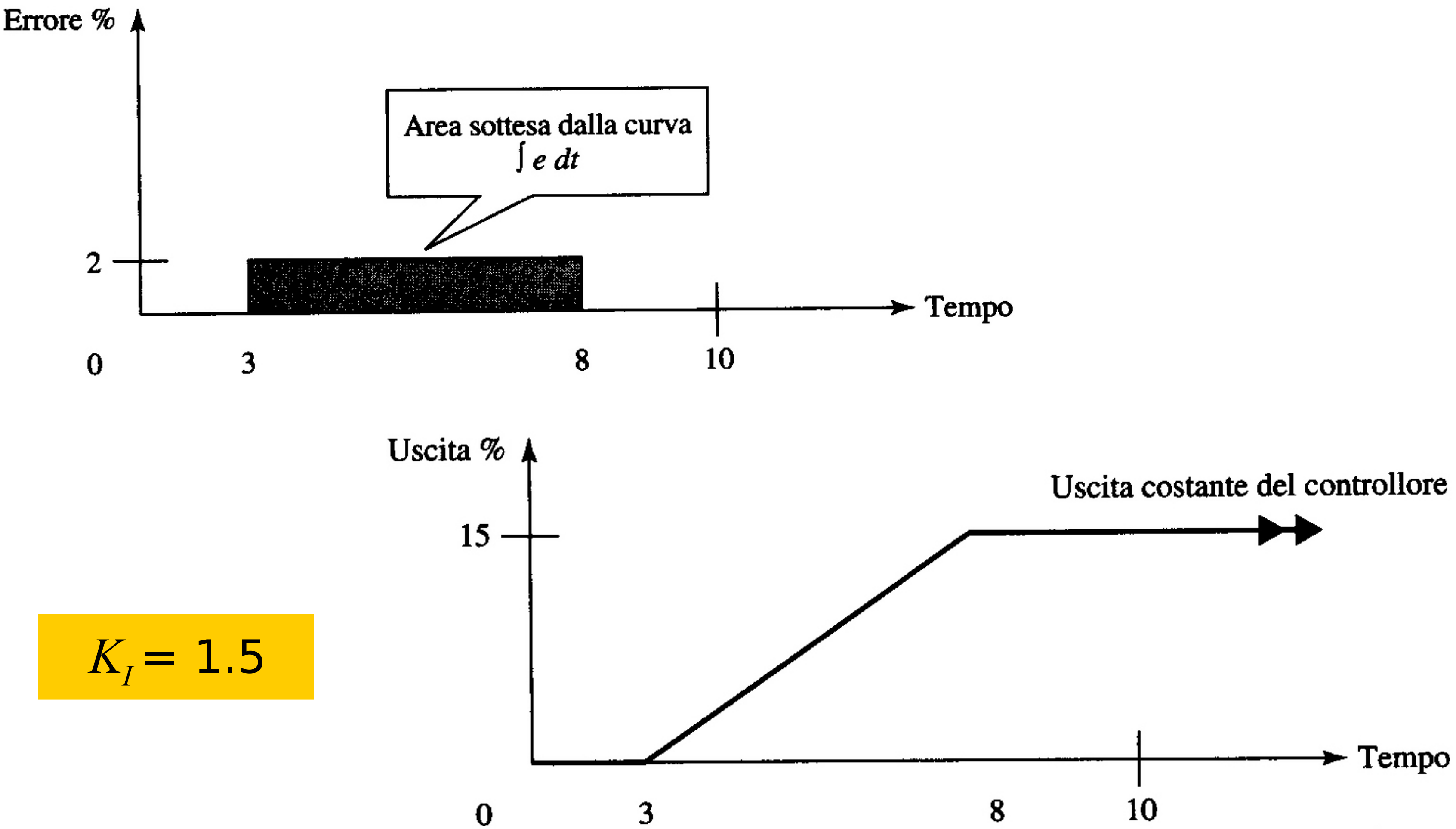
K_I = guadagno del termine integrale

Nota: il controllore integrale non viene usato da solo ma con un controllore proporzionale (PI) o con un controllore proporzionale e derivativo (PID)

Risposta nel tempo

Controllore integrale:

area sottesa dalla curva errore-tempo



$K_I = 1.5$

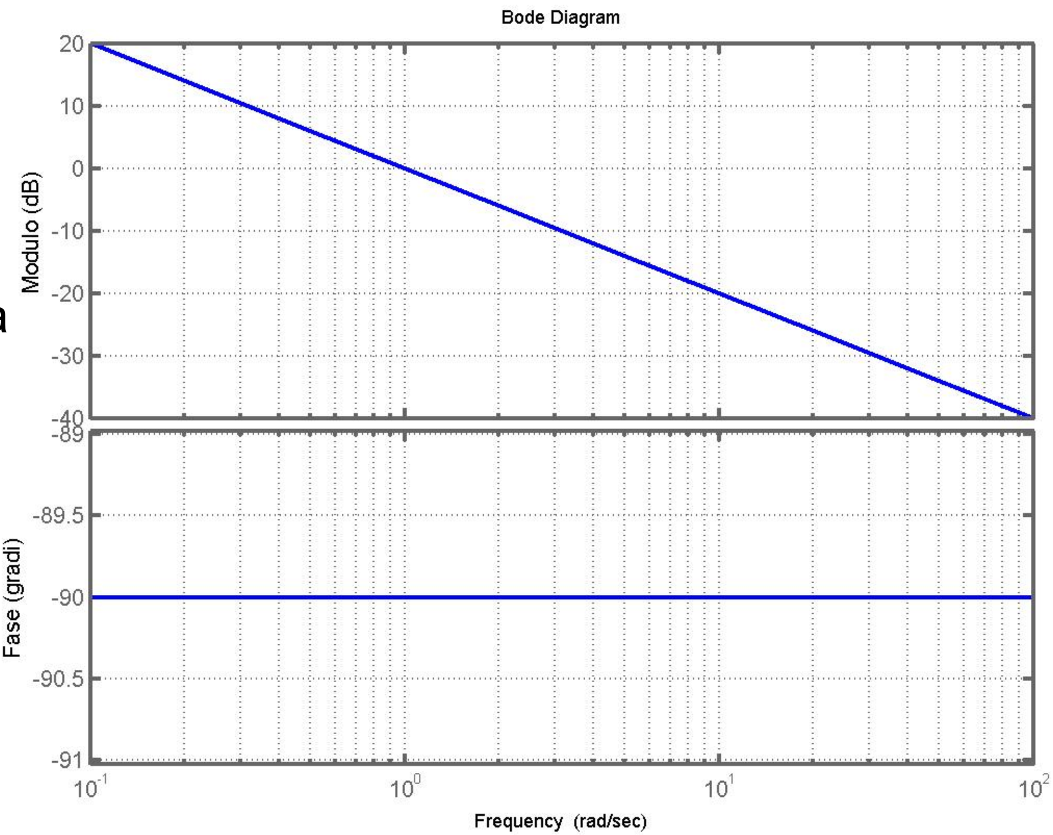
Risposta in frequenza

Controllore integrale:

- Modulo: $20 \log (K_I/\omega) = 20 \log(K_I) - 20 \log(\omega)$
- Fase: retta orizzontale ad un valore di –90°

Esempio (K_I =1):

- Modulo: $20 \log(1/\omega)$
  - Il guadagno si attenua ad una velocità di –20 dB/decade
  - Il guadagno del controllore integrale dipende dalla frequenza del segnale in ingresso
  - K_I definisce la frequenza di attraversamento a 0 dB
- Fase: -90°



Introduce un polo nell’origine nella funzione di trasferimento della catena diretta: sistema sicuramente di tipo 1. Inoltre il sistema è astatico rispetto a segnali di disturbo costanti e non noti che possono agire all’ingresso o all’uscita del processo da controllare

Risposta in frequenza: diagrammi di Bode

attenuazione di 20dB per decade e ritardo di fase costante pari a 90°,

peggioramento del margine di fase e quindi in generale della stabilità del sistema a ciclo chiuso

In generale: migliorano le prestazioni di regime e “peggiora la stabilità”

Controllore derivativo (D)

L'uscita non dipende dall'errore presente o passato, ma dalla velocità alla quale varia l'errore

Equazione nel dominio del tempo

$$m(t) = K_D \frac{d}{dt} e'(t)$$

Funzione di trasferimento

$$G(s) = \frac{M(s)}{E'(s)} = K_D s$$

Condizioni iniziali nulle

K_D = guadagno del termine derivativo

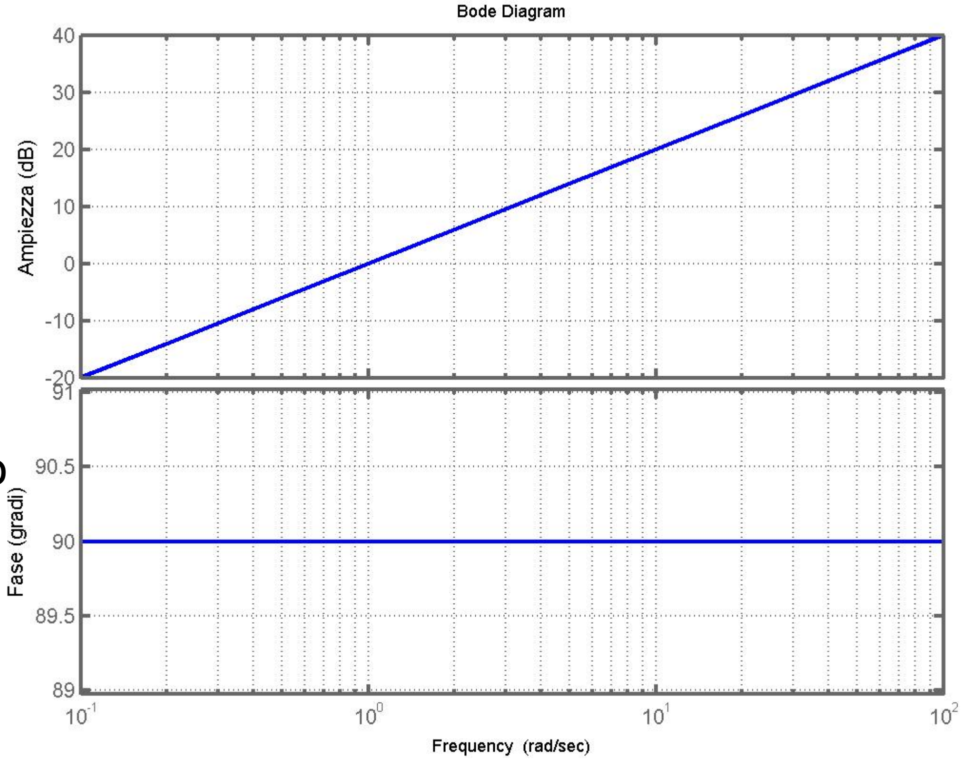
Risposta in frequenza

Controllore derivativo:

- Modulo: $20 \log (K_D\omega) = 20 \log(K_D) + 20 \log(\omega)$
- Fase: retta orizzontale a un valore di 90°

Esempio ($K_D = 1$):

- Modulo: $20 \log(\omega)$
  - Il guadagno aumenta ad una velocità di +20 dB/decade
  - Il guadagno del controllore derivativo dipende dalla frequenza del segnale in ingresso
  - $1/K_D$ definisce la frequenza di attraversamento a 0 dB
- Fase: 90°



Non viene mai utilizzato da solo ma assieme a P e PI.

In generale peggiora le prestazioni di regime.

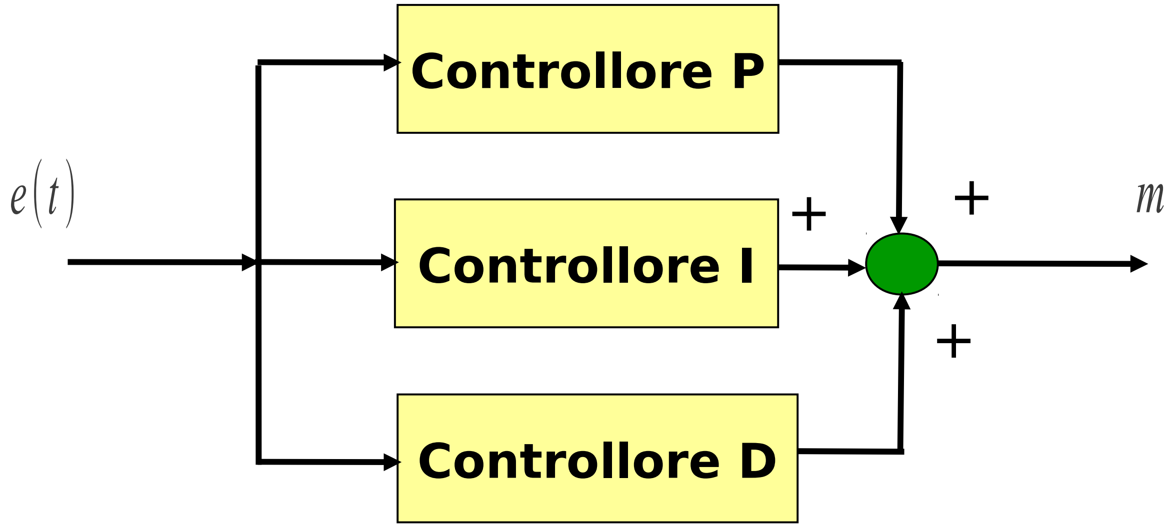
Risposta in frequenza: diagrammi di Bode

amplificazione di 20dB per decade e anticipo di fase costante pari a 90°,
miglioramento del margine di fase e quindi in generale della stabilità del sistema a ciclo chiuso.

In generale: peggiorano le prestazioni di regime e “migliora la stabilità”

Controllori composti: PI, PD, PID

Implementazione in parallelo (facile implementazione su sistemi di calcolo numerici): si può trattare ciascuna modalità di controllo separatamente



PID

Equazione nel dominio del tempo

$$m(t) = K_G e(t) + K_I \int_0^t e(\tau)\,d\tau + K_D \frac{d}{dt} e(t)$$

Funzione di trasferimento

m(s) = K_G*e(s) + K_I*e(s)/s + K_D*s*e(s)

$$G(s) = \frac{m(s)}{e(s)} = K_G + \frac{K_I}{s} + K_D s = K_G\left(1 + \frac{K_I}{K_G s} + \frac{K_D s}{K_G}\right) \rightarrow$$

$K_G/K_I = T_I$

$K_D/K_G = T_D$

$$G(s) = K_G\left(1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s\right) = K_G\left(\frac{\tau_D \tau_I s^2 + \tau_I s + 1}{\tau_I s}\right)$$

$$\tau_I = \frac{K_G}{K_I} \qquad \tau_D = \frac{K_D}{K_G}$$

Unisce le caratteristiche di (P) con quelle di (D) e di (I)

Combinazione di un elemento integrale (polo nell’origine) in serie con un elemento di anticipo del secondo ordine (due zeri a parte reale negativa)

Compito del progettista :
decidere K_I,K_D e K_G, ovvero KG,T_I e T_D

Limitazione del guadagno di alta frequenza

Il guadagno del controllore diventa infinito a frequenza infinita

- Fisica irrealizzabilità
- Amplificazione rumore

La funzione di trasferimento del blocco derivativo viene sostituita nel modo seguente:

$$\tau_D s \rightarrow \frac{\tau_D s}{1 + \frac{\tau_D s}{N}} \qquad 3 \leq N \leq 20$$

- A basse frequenze: controllore derivativo
- Ad alte frequenze: controllore proporzionale con sfasamento zero

Risposta in frequenza

Controllore PID

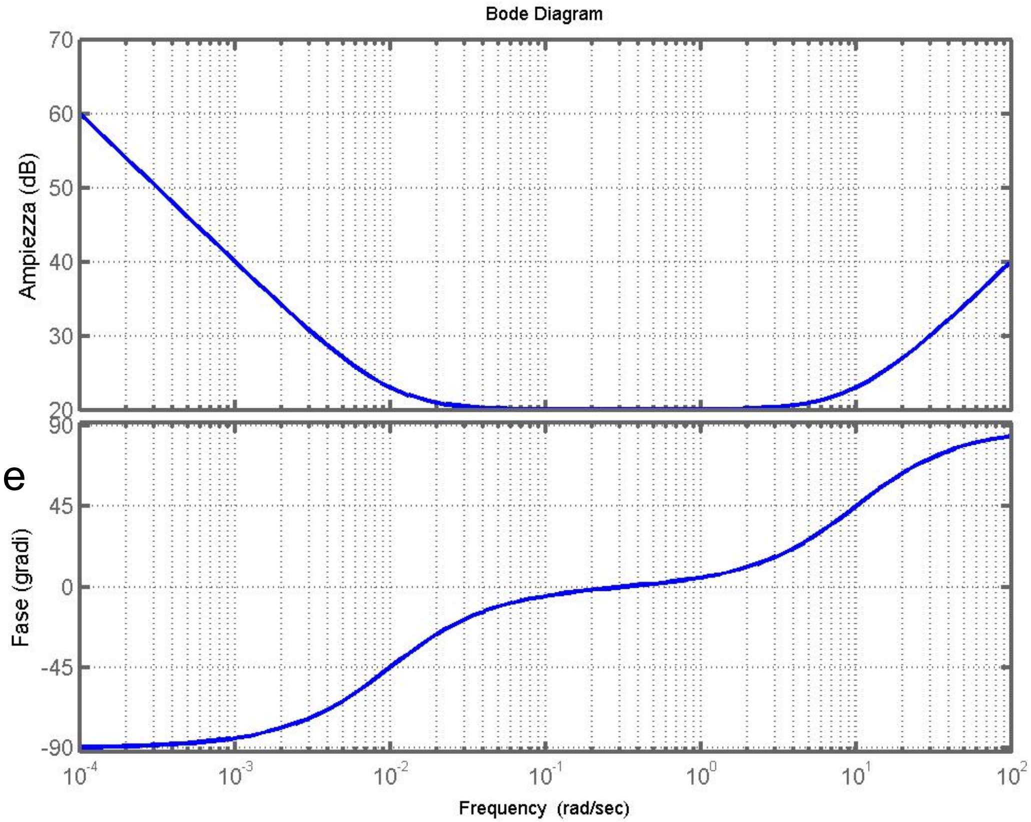
- A basse frequenze: controllore integrale
- A frequenze medie: controllore proporzionale
- Ad alte frequenze: controllore derivativo

Esempio: $$\frac{s^2 + 10s + 0.1}{s}$$

K_G=10

K_I=0.1

K_D=1



- Basse frequenze: controllore integrale
  - Guadagno: -20 dB/decade (k_I/ω)
  - Fase: -90°
- Medie frequenze: controllore proporzionale
  - Guadagno: 20 log (K_G)
  - Fase: da –45° a +45°
- Alte frequenze: controllore derivativo
  - Guadagno: +20 dB/decade
  - Fase: +90°
- Frequenze di taglio inferiore: K_I/K_G
  - Guadagno ≈ 20 log (K_G)
  - Fase: -45°
- Frequenze di taglio superiore: K_G/K_D
  - Guadagno ≈ 20 log (K_G)
  - Fase: +45°

Determinazione sperimentale delle impostazioni del controllore

Coefficienti “ottimi” per un controllore PID: ottenuti da test sperimentali

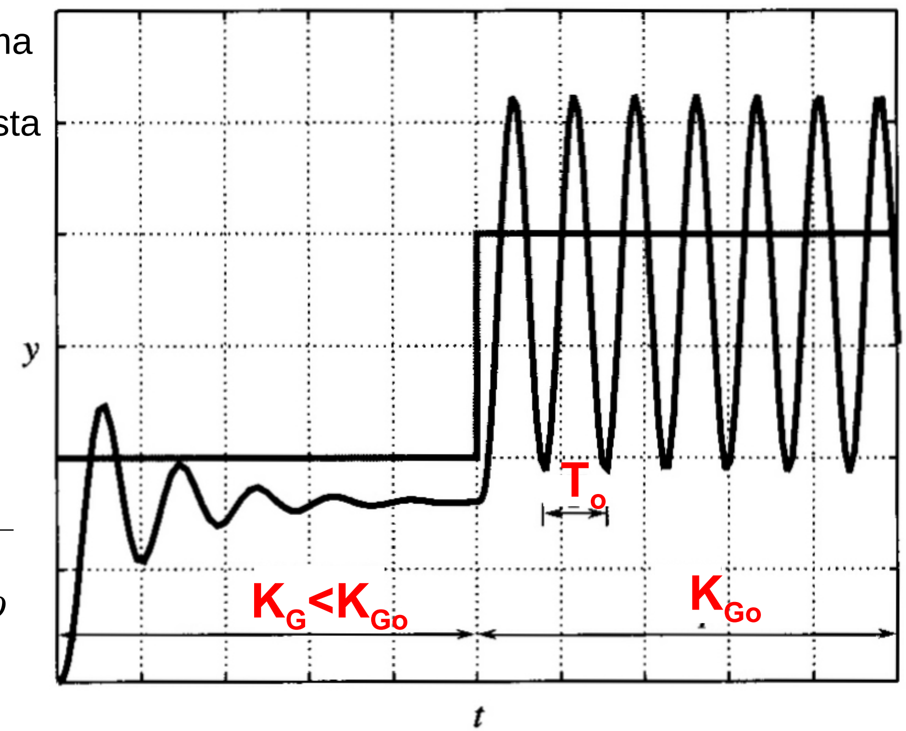
- Prima tecnica di Ziegler-Nichols → Sistema fatto funzionare in CATENA CHIUSA
- Seconda tecnica di Ziegler-Nichols → Sistema in CATENA APERTA

Regole di predisposizione parametri del PID (solo per processi stabili)

Primo metodo di Ziegler e Nichols (anello chiuso):

Azione integrale e azione derivatrice nulle, si aumenta K_G sino a portare il sistema in oscillazione; si determinano il periodo T_o della oscillazione ed il valore del guadagno K_{Go}; da questi valori si parte per scegliere $K_G \quad K_I \quad K_D$

Principio : si aumenta gradualmente K_G per portare il sistema ad una situazione di quasi-instabilità, si misura il periodo oscillazione e si misura il guadagno che corrisponde a questa situazione di quasi-instabilità; infine si scelgono i parametri del controllore attraverso formule empiriche



P $$K_G = 0.5\, K_{Go}$$

PI $$K_G = 0.45\, K_{Go} \qquad K_I = \frac{K_G}{0.85\, T_o}$$

PID $$K_G = 0.6\, K_{Go} \qquad K_I = \frac{K_G}{0.5\, T_o} \qquad K_D = K_G\, 0.12\, T_o$$

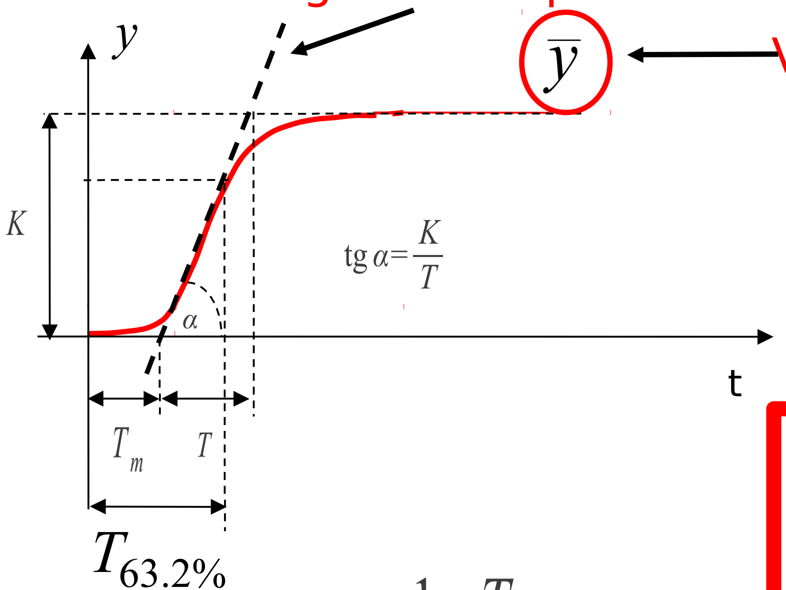
Sufficiente distanza dalla condizione di instabilità

Secondo metodo di Ziegler e Nichols (anello aperto):

Trovare K, T, T_M in modo che l'uscita reale del processo "assomigli" il più possibile con quella del modello → IDENTIFICAZIONE DEL MODELLO DEL PROCESSO

Tangente nel punto di massima pendenza (flesso)

Valore di regime



Parametri ricavati dalla risposta ad un "gradino" unitario

Per gradino con ampiezza $\bar{u}$: $K = \frac{\bar{y}}{\bar{u}}$

Modello semplificato del processo:

$$P(s) = \frac{K e^{-sT_m}}{1 + T s}$$

T_m= tempo morto
T= costante di tempo
K= guadagno statico

P $\quad K_G = \frac{1}{K}\frac{T}{T_m}$

PI $\quad K_G = \frac{0.9}{K}\frac{T}{T_m} \qquad K_I = \frac{K_G}{3.3\,T_m}$

Nota: a volte al posto di T si utilizza:

$$\tau = T_{63.2\%} - T_m$$

PID $\quad K_G = \frac{1.2}{K}\frac{T}{T_m} \qquad K_I = \frac{K_G}{2\,T_m} \qquad K_D = K_G\ 0.5\ T_m$