> [!warning] Cosa ci interessa? Ricordiamo che a noi interessano le specifiche del **sistema in anello chiuso**

> [!tldr] Obiettivo
> $$y(t) \approx w(t) = y_{\mathrm{RIF}}$$

Riepilogo specifiche

Stabilità robusta Si traduce in una certa $M_f > M_f^*$ da ottenere. Ci possono essere incertezze sui parametri e sui ritardi.

Precisione statica

- Errore in modulo o
- errore a regime

in risposta a segnali *canonici*, ovvero segnali del tipo $1/s^k$. Di solito useremo il gradino

> [!question] Guadagno e poli? Quando uno e quando l'altro? [[#Sintesi del regolatore statico]]

Precisione dinamica

- **Sovraelongazione**
- **Tempo di assestamento**

Attenuazione disturbo in uscita

Immaginiamo un $d(t)$ con una certa ampiezza sinusoidale. Vogliamo che sulla $y_d(t)$ sia attenuata di ....

Specificata sul range di pulsazioni e sull'attenuazione (positiva) in dB.

Esempio: Se lo voglio attenuare di 40dB

Fisica realizzabilità del regolatore

Possiamo aggiungere dei poli in alta frequenza

Vincoli sul diagramma di bode della L

Specifiche in termini di guadagno d'anello

Precisione statica

> [!warning] Nota: Se $L(s)$ ha polo in $s = 0 \implies e_\infty = 0$, ma questo introduce uno sfasamento di $-90°$

Precisione dinamica

Sovraelongazione $S\%$ *Vedi onenote*

Bode: rettangolo nella FASE da non toccare SOLAMENTE ad ω_c.

Attenuazione disturbo in uscita $d(t)$

Ci interessa solamente in un range di frequenze, ovvero quelle dove esiste $d(t)$ (a basse frequenze)

Se d(t) è una sinusoide, a regime l'uscita è una sinusoide con la stessa fase e ampiezza moltiplicata per il modulo della funz di trasferimento, ovvero $S(s)$

Avremo anche uno sfasamento ma ci interessa solo l'ampiezza

Il modulo della S è l'opposto del modulo della L di omega a basse frequenze, ed è li che agisce la d(t)

Quindi La specifica si traduce in $|L(j\omega)|_{db} >= A_d\ dB$, ovvero **una zona a basse frequenze** in cui la $L(j\omega)$ non deve passare

Bode: rettangolo IN BASSO A SINISTRA

Attenuazione disturbo di misura $n(t)$

Anche questo **ci interessa solo in un range di frequenze**, ovvero quelle di $n(t)$ (freq. elevate).

Per attenuare la F oltre ω_c dobbiamo ridurre $|L(j\omega)|_{dB}$. (vedi approssimazione dalle slide).

$$|L(j\omega)|_{dB} \leq -A_n\ dB$$

con A_n attenuazione che vogliamo raggiungere.

QUINDI si traduce in una zona ad alte frequenze in cui la L non deve passare

Bode: rettangolo IN ALTO A DESTRA

Moderazione variabile di controllo $u(t)$

Ci interessano relativamente.

Sono specifiche sulla $Q(t)$.

In particolare dobbiamo: - limitare ω_c, perchè prima la Q è controllata solo da G - realizzare R come passa basso

Fisica realizzabilità del regolatore $R(s)$

> [!warning] Importante Il **grado relativo** del regolatore deve essere ≥ 0.
>
> Il grado del denominatore di $R(s) \geq$ del grado del denominatore

Come lo garantiamo? Aggiungiamo poli in alta frequenza!

Sintesi del regolatore

Metodo "loop shaping"

- *loop*: $L(j\omega)$
- *shaping*: dare una certa forma

Obiettivo: scegliere **poli** e **zeri** di $R(s)$

Lavoriamo avendo in mente il diagramma di Bode della $L(j\omega)$ risultante.

$$L(j\omega) = R(j\omega)G(j\omega)$$

Passaggi

Progettiamo R(s) come - regolatore statico: soddisfa specifiche statiche - regolatore dinamico: soddisfa specifiche dinamiche

in serie.

Regolatore statico

Di solito $|e_\infty| \leq e^\star, e_\infty = 0$ in risposta a qualcosa.

Per fare ciò possiamo: - aumentare il guadagno - inserire poli nell'origine

Struttura:

$$R_s(s) = \frac{\mu_s}{s^k}$$

Decidere - se aumentare il guadagno - se e quanti poli mettere nell'origine ### Regolatore dinamico

Di solito aggiungeremo poli / zeri **reali**.

> [!warning] Attenzione Posso aggiungere **solo uno dei due tra** μ_s **e** μ_d (o lo metto nel regolatore statico o lo metto nel regolatore dinamico).
>
> Questo perchè i due blocchi sono in serie, quindi la funzione di trasf. del regolatore intero è il prodotto delle due f. di trasf.

Sintesi del regolatore statico

Aumentando il guadagno **DIMINUISCO MA NON PORTO MAI A ZERO** il mio errore a regime.

Posso altrimenti mettere un **polo nell'origine**.

> [!question] Perchè non mettere sempre un polo nell'origine?
>
> Perchè mi aggiunge **sempre** uno sfasamento nelle frequenze di -90°, che quindi poi è difficile compensare per rispettare il margine di fase.

Sintesi del regolatore dinamico

Obiettivi: - imporre ω_c in un certo intervallo - garantire un dato margine di fase M_f - garantire una certa attenuazione a pulsazioni elevate (specifica $n(t)$, non è troppo difficile)

Lavoriamo sul **sistema esteso**, ovvero il sistema R_s in serie a G.

Scenario A

Rete ritardatrice Funzione di trasf. che ha **- un polo reale negativo in** $-\frac{1}{\tau s}$ **- uno zero reale negativo in** $-\frac{1}{\tau}$

$$R_d(s) = \frac{1 + \alpha \tau s}{1 + \tau s} \qquad 0 < \alpha < 1$$

Valore di regime di attenuazione: $20 \log(\alpha) < 0 dB$

> [!warning] Attenzione La fase della rete è **sempre negativa**.
>
> In realtà non ci piace, ma bisogna considerarlo. L'effetto che vogliamo è quello di attenuare dopo una certa soglia.
>
> $$\omega^{\star} = \frac{1}{\tau \sqrt{\alpha}}$$
>
> Voglio fare in modo che nel mio range dove la fase mi importa $[\omega_{c,\min}; \omega_{c,\max}]$ il ritardo sia già rientrato.

Tuning approssimato Lo posso usare se posso abbassare abbastanza dove si trova il polo. Il problema si pone se "sfaccio" quello che ho fatto nell'attenuazione dei disturbi. Altrimenti uso le [[#Formule di inversione]] #### Formule di inversione

Scenario B

Non risolvo nulla se cambio la zona di attraversamento.

Obiettivo

- Aumentare la fase
- Amplificare **il meno possibile** l'ampiezza

Come facciamo?

- Aggiungiamo 1 o più zeri a pulsazioni **prima** di quella di attraversamento
- Aggiungiamo 1 o più poli a pulsazioni **più elevate** per evitare amplificazione e fisica realizzabilità

Rete ritardatrice

Regolatore dinamico per lo scenario B

Un'alternativa è riprovare B, ma per semplicità posso anche risolvere la A

Controllori PID

PID: Proporzionale Integrale Derivativo

Casi speciali

Nome	Caratt.
Regolatore P	Proporzionale
Regolatore I	Rete ritardatrice con polo nell'origine e zero a ∞
Regolare PI	Rete ritardatrice con polo nell'origine e zero in $-1/T_i$
Regolatore PD	Rete anticipatrice con zero in $-1/T_d$ e polo a infinito.