

# Progetto CAT 2 2023

di Luca Boni

Ingegneria dell'Automazione

Progetto n.1

# Consegna Progetto

---

Si consideri il sistema descritto dalla funzione di trasferimento

$$G(s) = \frac{5000}{(s + 80)(s^2 + 2s + 60)}$$

Si richiede di progettare un regolatore che soddisfi le seguenti specifiche:

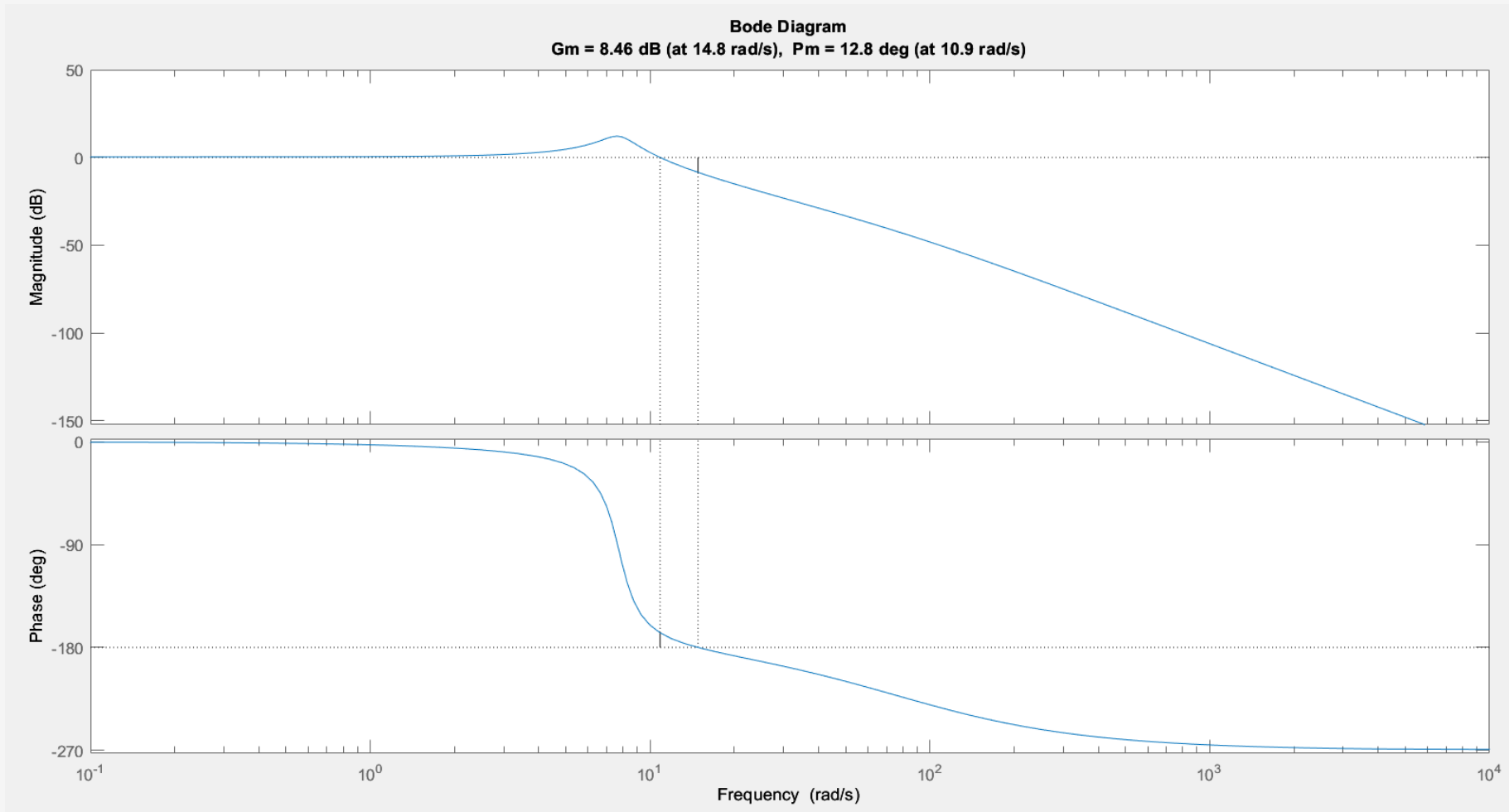
- **Errore a regime nullo** in presenza di ingresso di riferimento a **gradino di ampiezza massima pari a 2.0** e disturbo sull'uscita a gradino di **ampiezza massima pari a 0.1**.
- **Massima sovraelongazione** della risposta al gradino di riferimento inferiore al **5%**.
- **Tempo di assestamento al 1%** della risposta al gradino di riferimento inferiore a **0.8s**.
- **Margine di fase superiore a 40 gradi**, per garantire robustezza.

Sulla misura è sovrapposto un **rumore di misura sinusoidale** a frequenza **2000rad/s** e **ampiezza massima pari a 0.005**.

La soluzione proposta non deve presentare marcate code di assestamento.

Dimensionare l'attuatore al fine di garantire il funzionamento a regime (in presenza contemporanea del riferimento, dei disturbi e del rumore) e valutare di quanto deve essere sovradimensionato per gestire il transitorio.

# Analisi del Plant



Abbiamo un polo  
reale a -80 e 2 poli  
complessi  
coniugati

$$\begin{cases} 2\omega\delta = 2 \\ \omega^2 = 60 \end{cases}$$

	G	
$\omega$	7,745967 rad/s	
$\delta$	0,129099	
$\sigma$	26,66667	
Mf	12,802 gradi	
Ma	8,4584 dB	
omegac	10,863 rad/s	
omegaf	14,832 rad/s	

# Regolatore statico (Rs)

---

la parte statica deve:

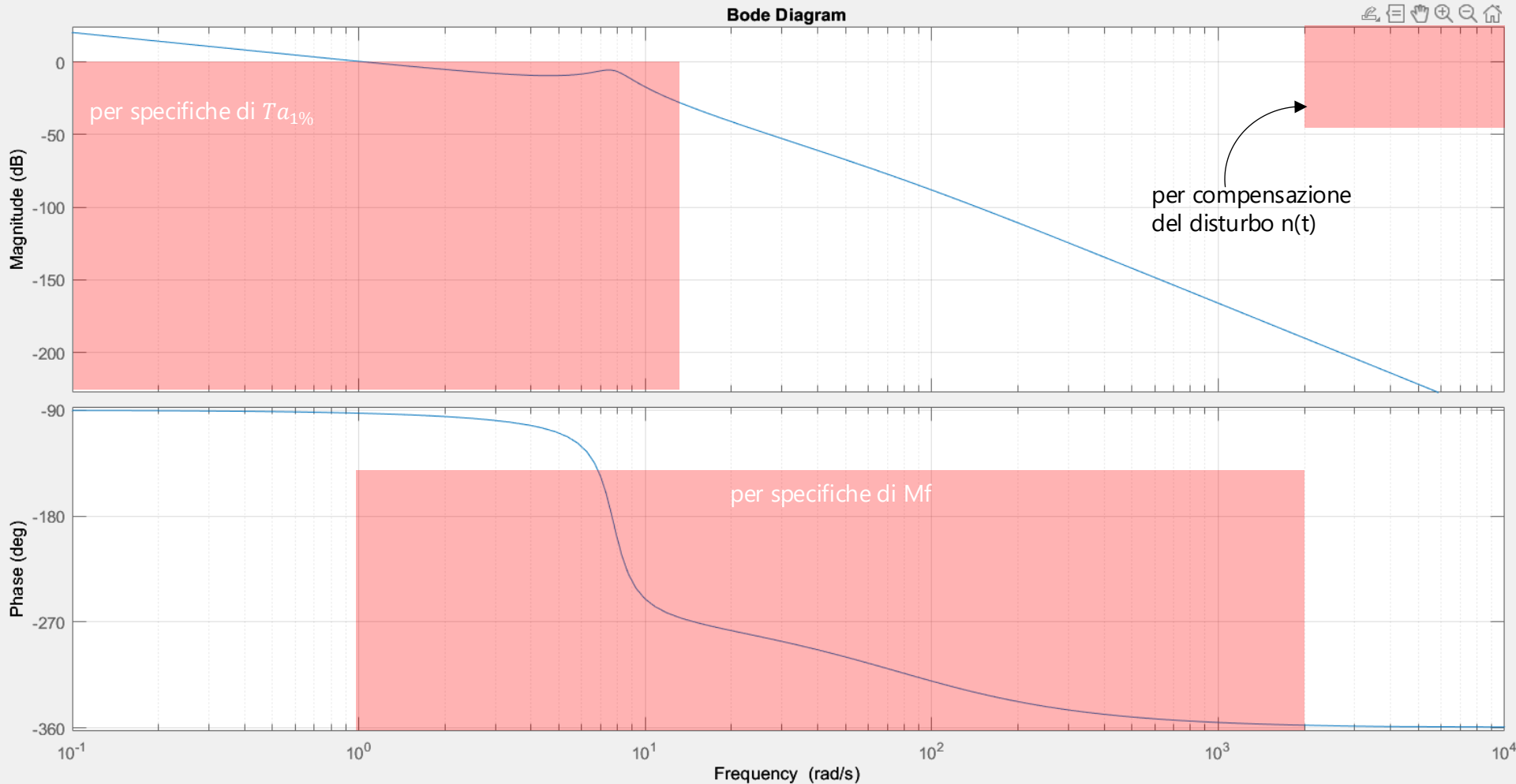
- garantire errore in uscita a regime nullo
- compensare un errore sull'uscita a gradino di ampiezza 0.1

È necessario un polo nell'origine per sopperire alla prima richiesta, soddisfacendo così anche la seconda, visto l'andamento costante di un disturbo a gradino:

$$R_s = \frac{1}{s}$$

Così facendo possiamo definire la G estesa:  $G_e = R_s * G$

# Sistema esteso (Ge)



Specifiche date:

- $Ta_{1\%} \leq 0,8$   
( $\omega_c \geq 14,375 \text{ rad/s}$ )
- $Mf \geq 40^\circ$
- $S\% \leq 5\%$   
( $\delta \geq 0,75$ )
- Attenuare  $n(t)$   
( $\omega_n = 2000 \text{ rad/s}$ ;  
 $An = -46 \text{ dB}$ )

Ci troviamo in uno scenario B piuttosto gravoso che ci richiede di utilizzare una o più reti anticipatrici

# Progetto rete anticipatrice (Rd)

Devo fare in modo di avere  $M_f$  più alto di 40 gradi a pulsazioni superiori di 14,375;

devo, quindi, dare uno sfasamento positivo molto ampio per avere un margine di fase idoneo sotto quella determinata pulsazione.

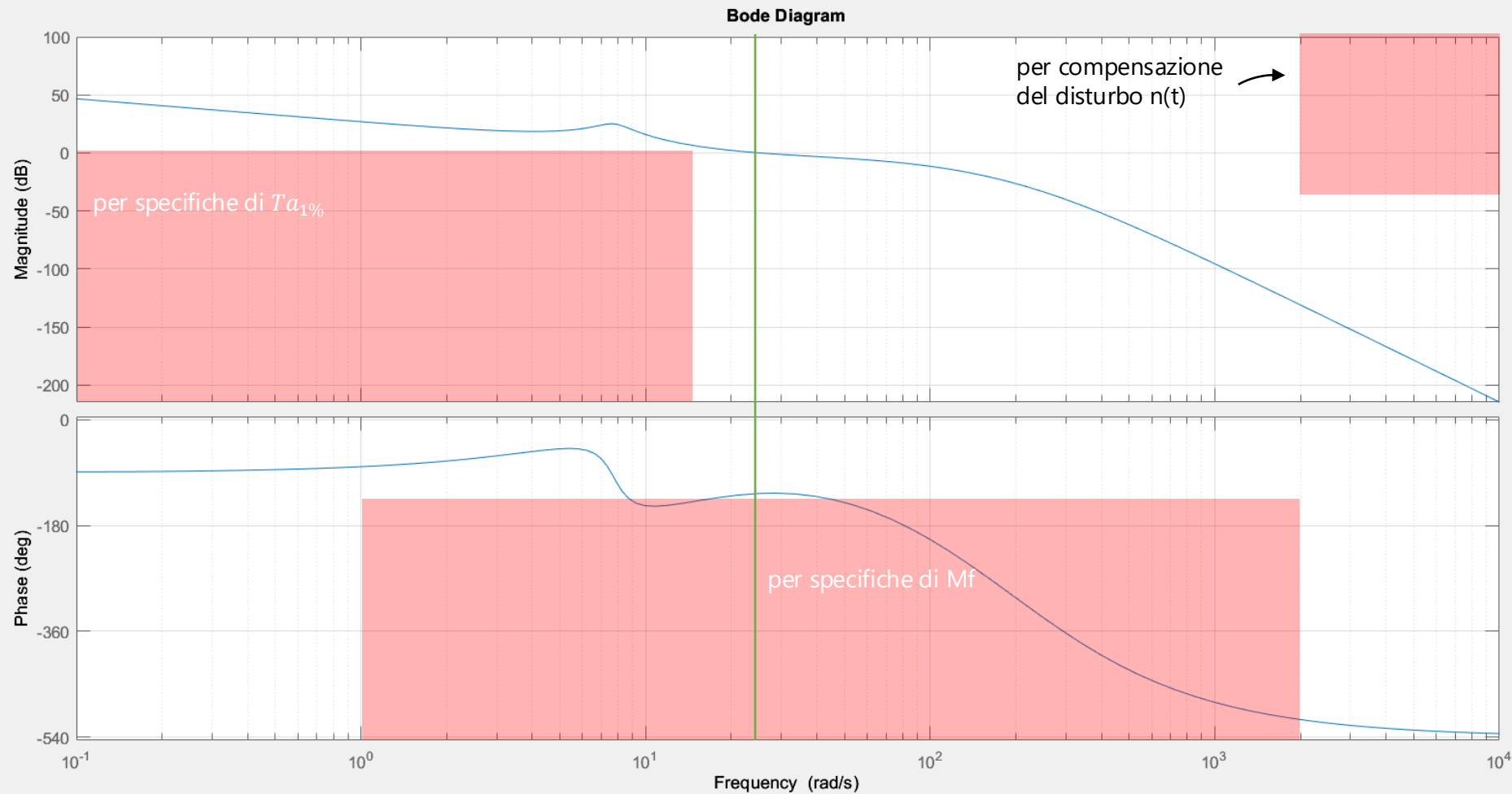
Utilizzerò quindi 3 zeri reali per garantire il margine di fase maggiore di 40 gradi in quella specifica banda di frequenze, accoppiati con 2 poli per garantire la realizzabilità fisica:

- Scelgo  $\omega_c \cong 20 \frac{rad}{s} \Rightarrow |Ge(\omega_c)| = -41.1$  ;  $Arg(Ge(\omega_c)) = -277$
- $M_f \text{ imposto} = 75 \rightarrow \text{Sfasamento da imporre} = 172^\circ \Rightarrow Rho = 1,65$
- $\tau_z = \frac{Rho}{\omega_c}$  ;  $\tau_p = \frac{1}{10 * \omega_c}$
- $A = 20 \log_{10}(\sqrt{1 + Rho^2}) \Rightarrow \mu = 0,68 * 10^{\frac{2 * A + \omega_c}{-20}}$

$$R_d = 20,7336 * \frac{(1 + 0.0825s)^3}{(1 + 0,005s)^5}$$

$$L = R_d * Ge$$

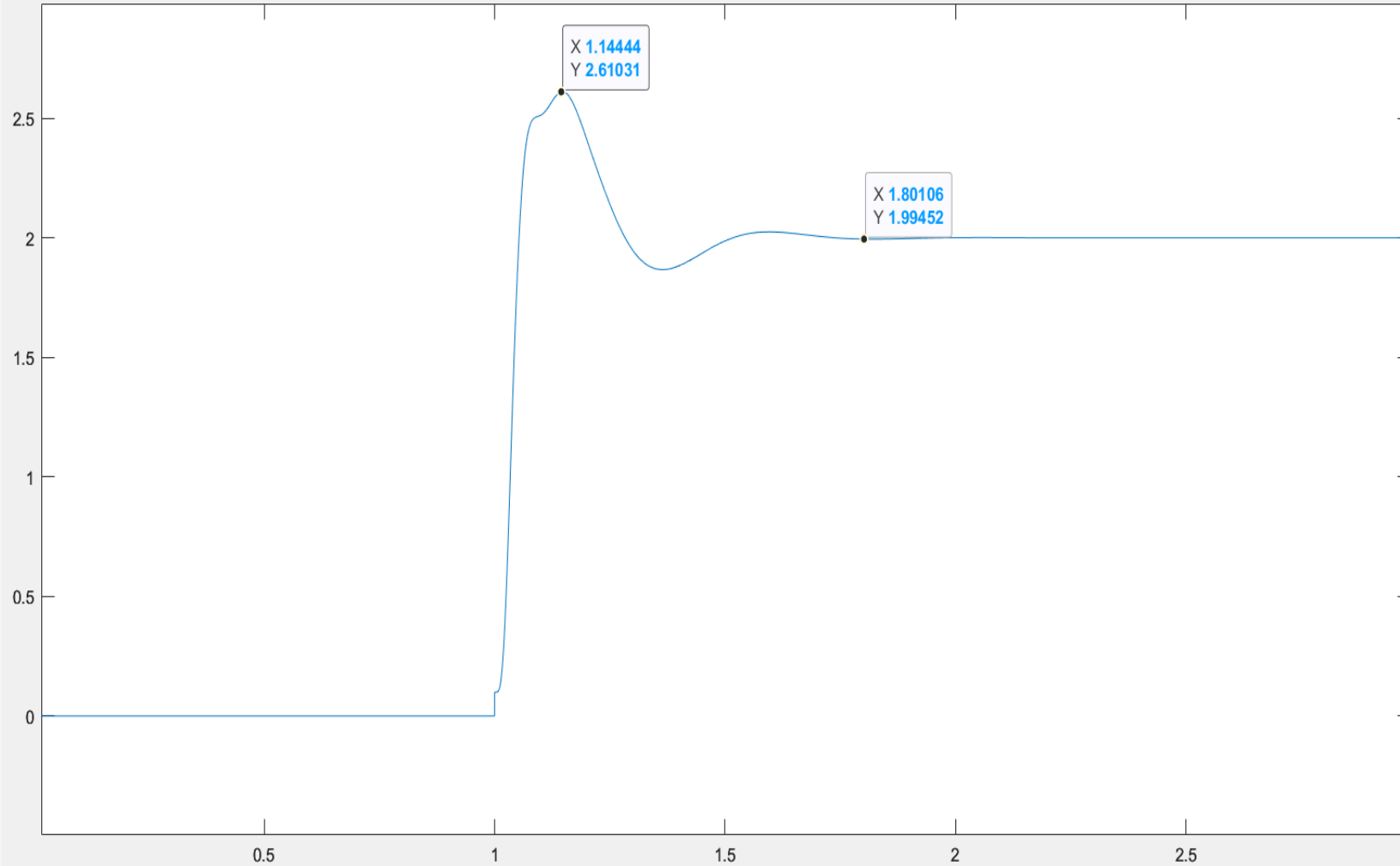
# Sistema ad anello aperto (L)



Risultati ottenuti:

- $\omega_c = 25.2807$  rad/s
- $Mf = 54.5836^\circ$
- $|L(j\omega_n)| \leq -46dB$

# Risposta a gradino sistema in retro



Dall'andamento nel tempo della risposta a gradino possiamo notare 2 cose:

- È ampiamente rispettata la specifica sul tempo di assestamento
- C'è una sovraelongazione del segnale maggiore del 5% (0,1)

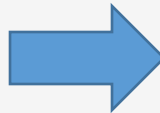
Possiamo utilizzare una rete che arrotondi il segnale di riferimento in modo da abbassare la sovraelongazione



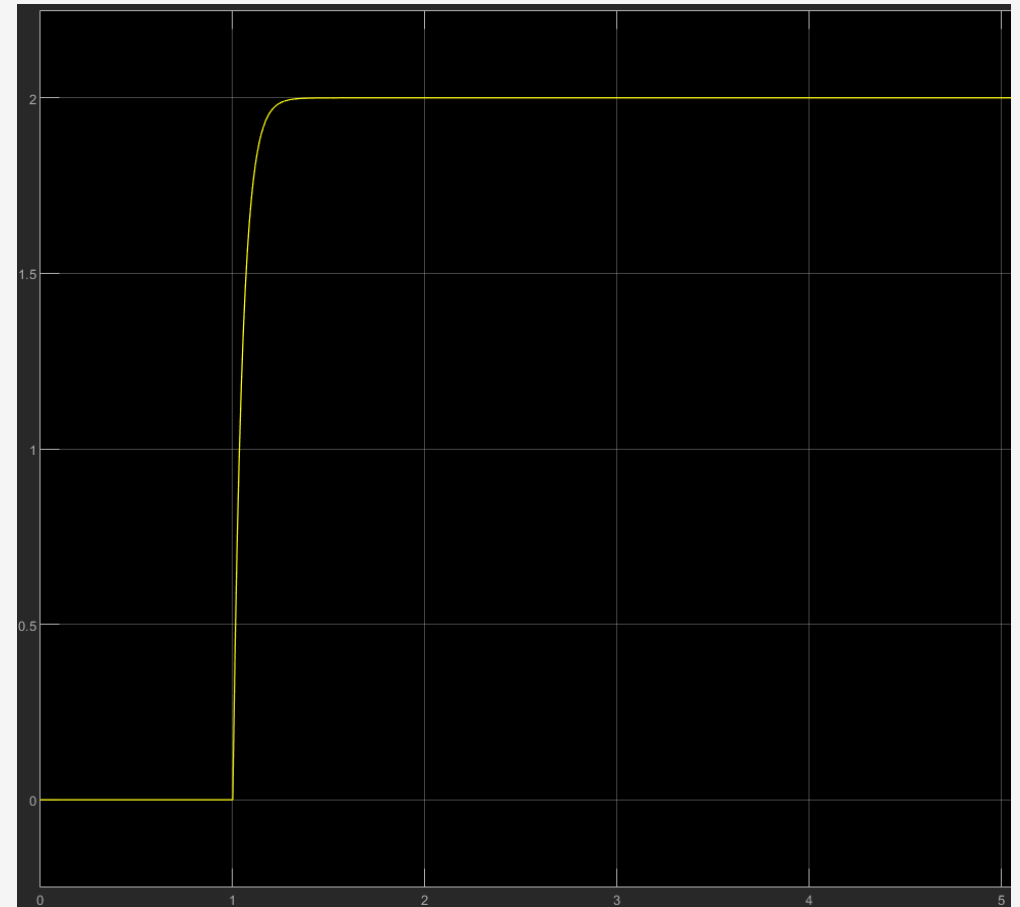
## Compensazione del segnale di riferimento (Rfp)

$$R_{fp} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\omega_c} s} = \frac{1}{1 + 0,05s}$$

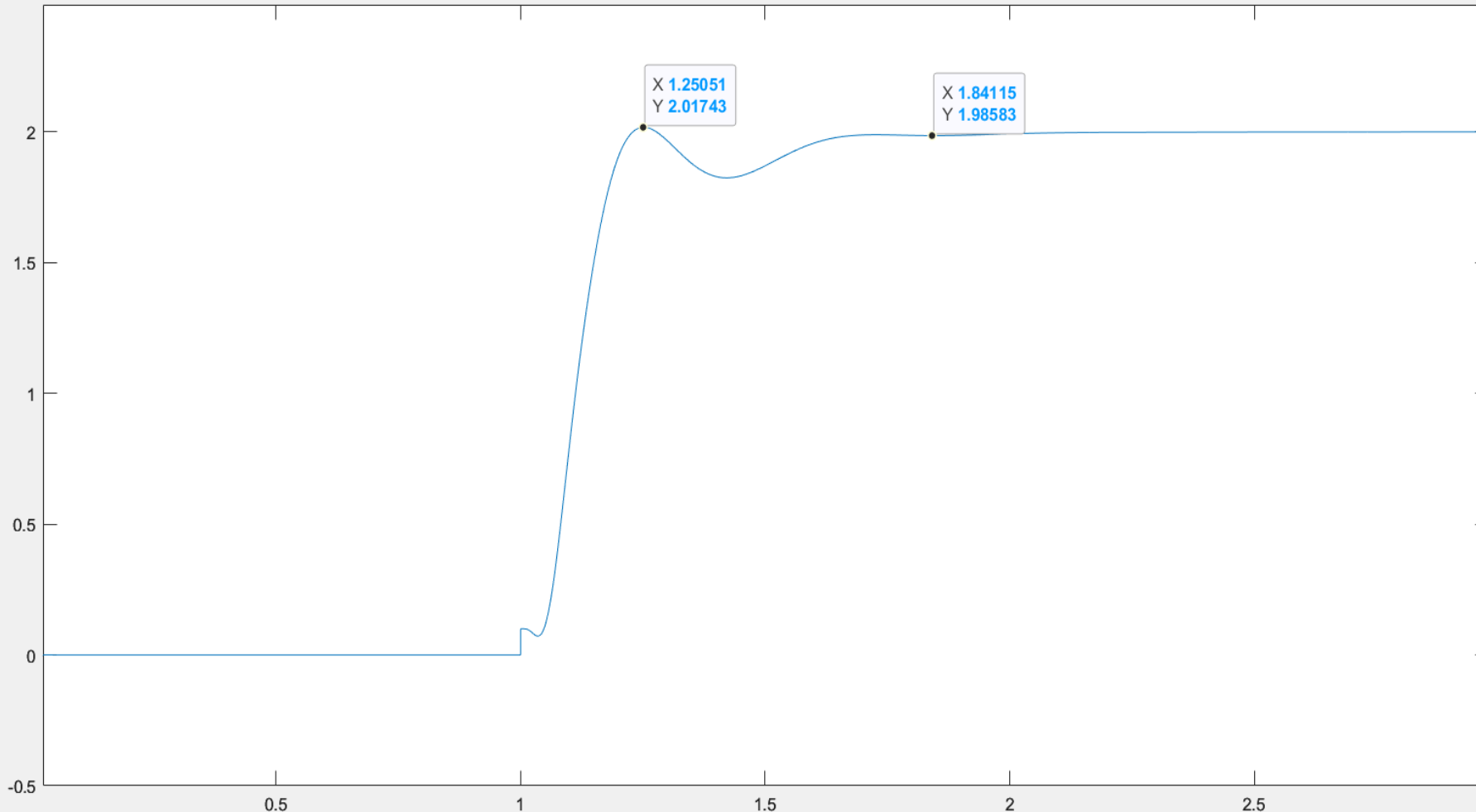
w



wf



## Azione in avanti (Rff)



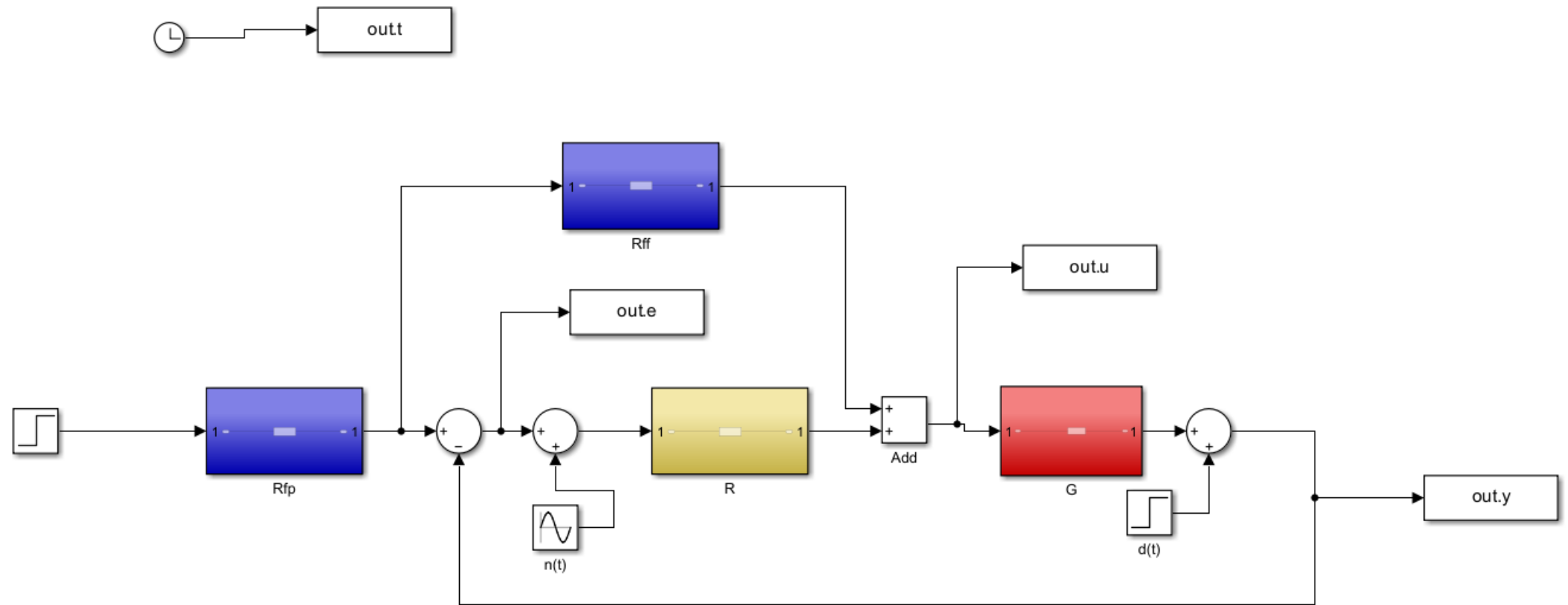
Ho poi migliorato ulteriormente l'inseguimento del riferimento con una rete feed forward andando in cancellazione ai poli CC del sistema.

$$Rff = \frac{(s^2 + 2s + 60)}{(s + 1000)^2}$$

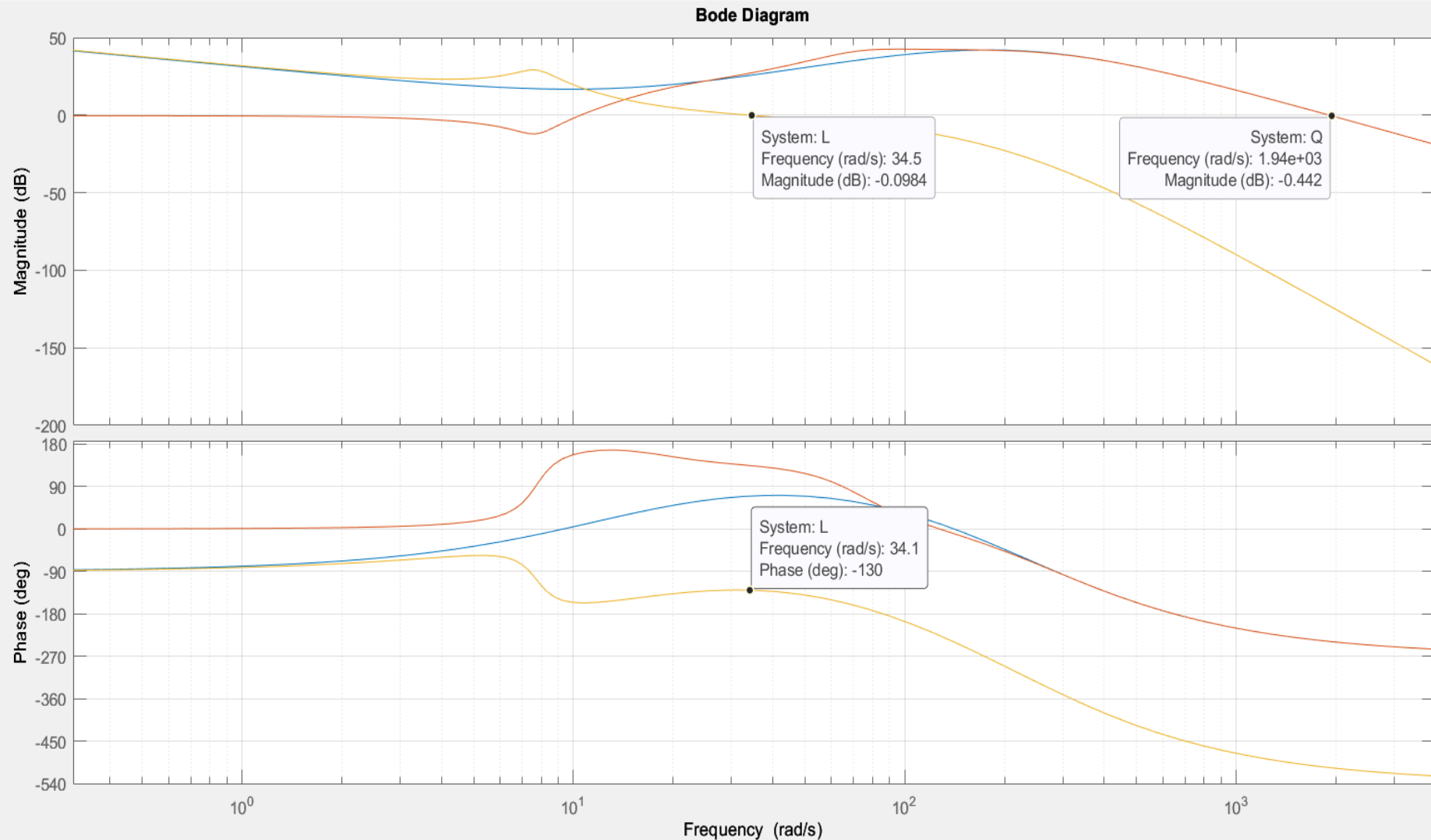
Specifiche soddisfatte:

- $Ta_{1\%} \leq 0,8$
- $S\% \leq 5\%$

# Sistema su Simulink



# Funzione di sensitività del controllo

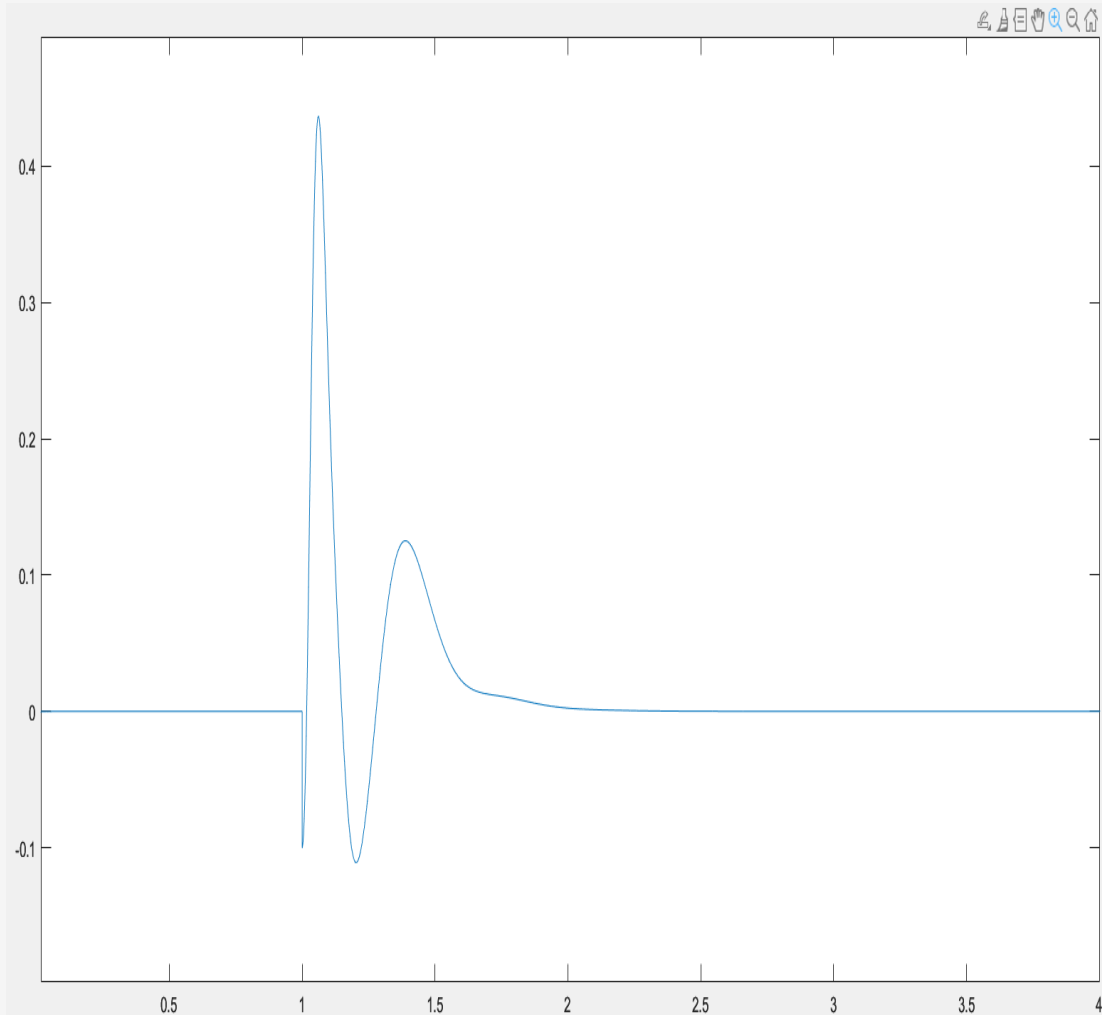


- $Mf \geq 40^\circ$
- $14,375 < \omega_c < 2000$
- $Ta_{1\%} \leq 0,8$
- $S\% \leq 5\%$

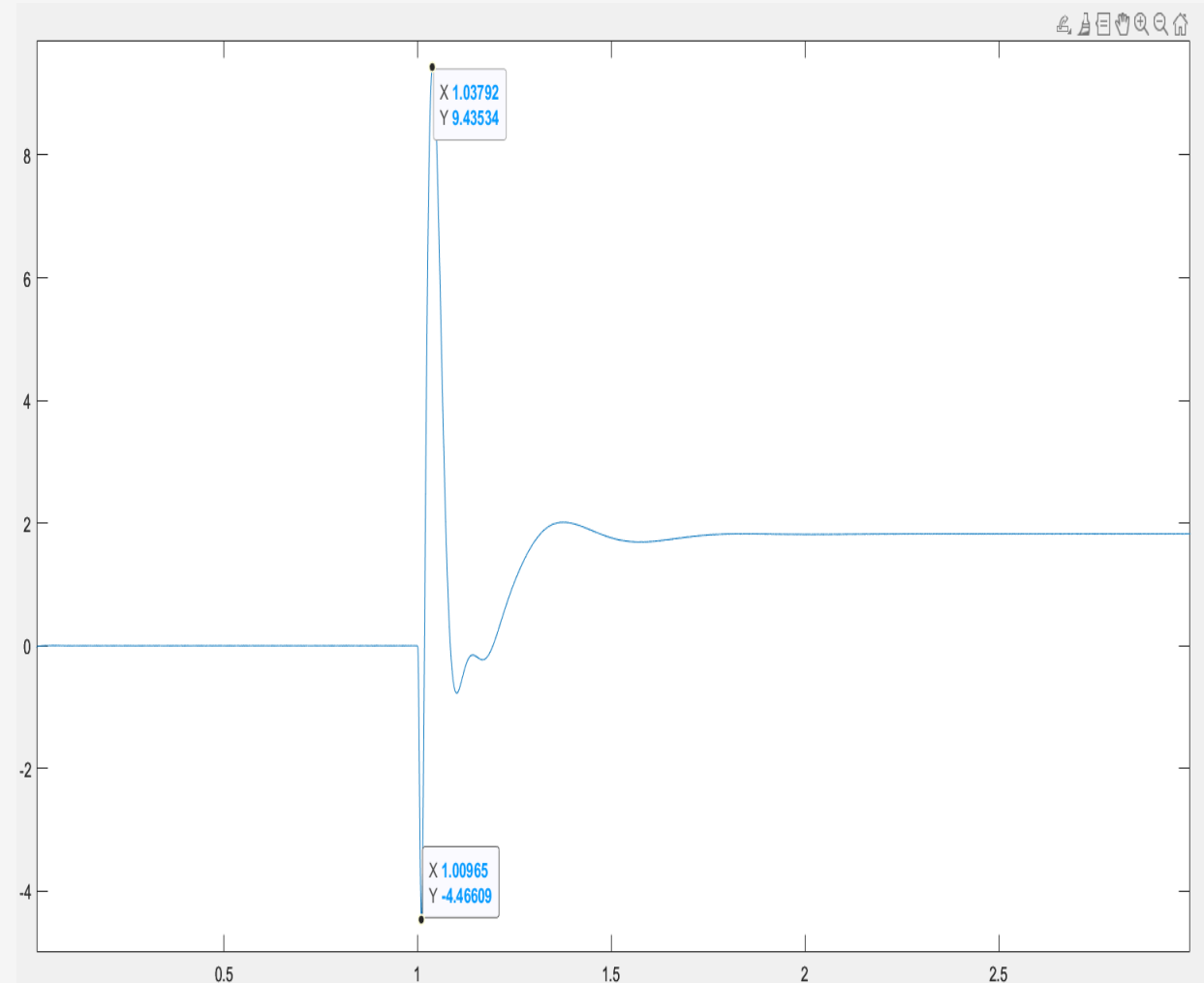
Si può notare come la funzione di sensitività del controllo Q con linea rossa attraversi lo 0 prima dei 2000 rad/s in modo da attenuare il disturbo di misura

# Uscite del sistema $e(t)$ e $u(t)$

$e(t)$



$u(t)$



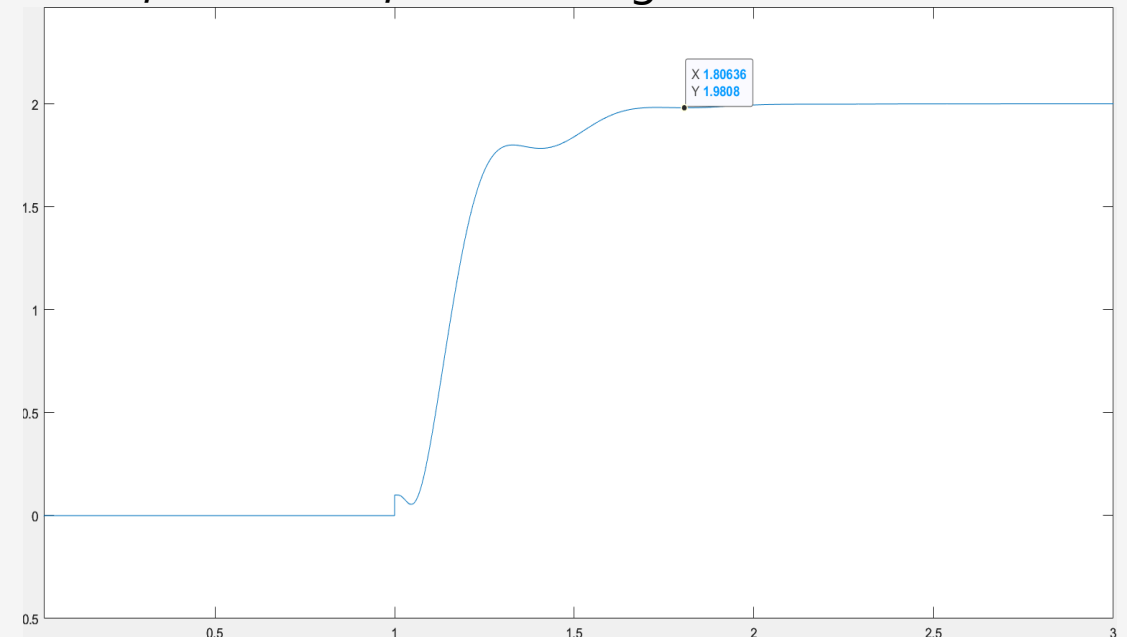
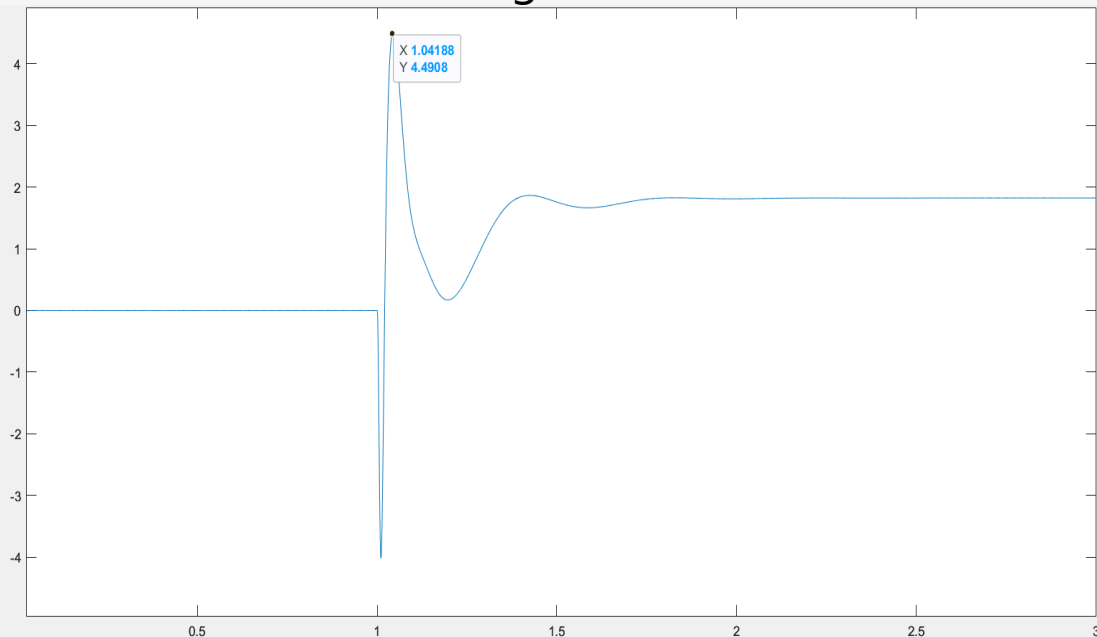
# Cerco di migliorare lo sforzo di controllo

Per diminuire il picco ho:

- Abbassato la frequenza di taglio del filtro passa basso in compensazione del segnale di riferimento

$$Rfp = \frac{1}{1 + \frac{1}{0,6\omega_c} s}$$

- ho abbassato il margine di fase richiesto all'Rd da 75° a 50° →  $\varphi = 147 \rightarrow \rho = 1.4$  da grafico



# Conclusioni sull'attuatore

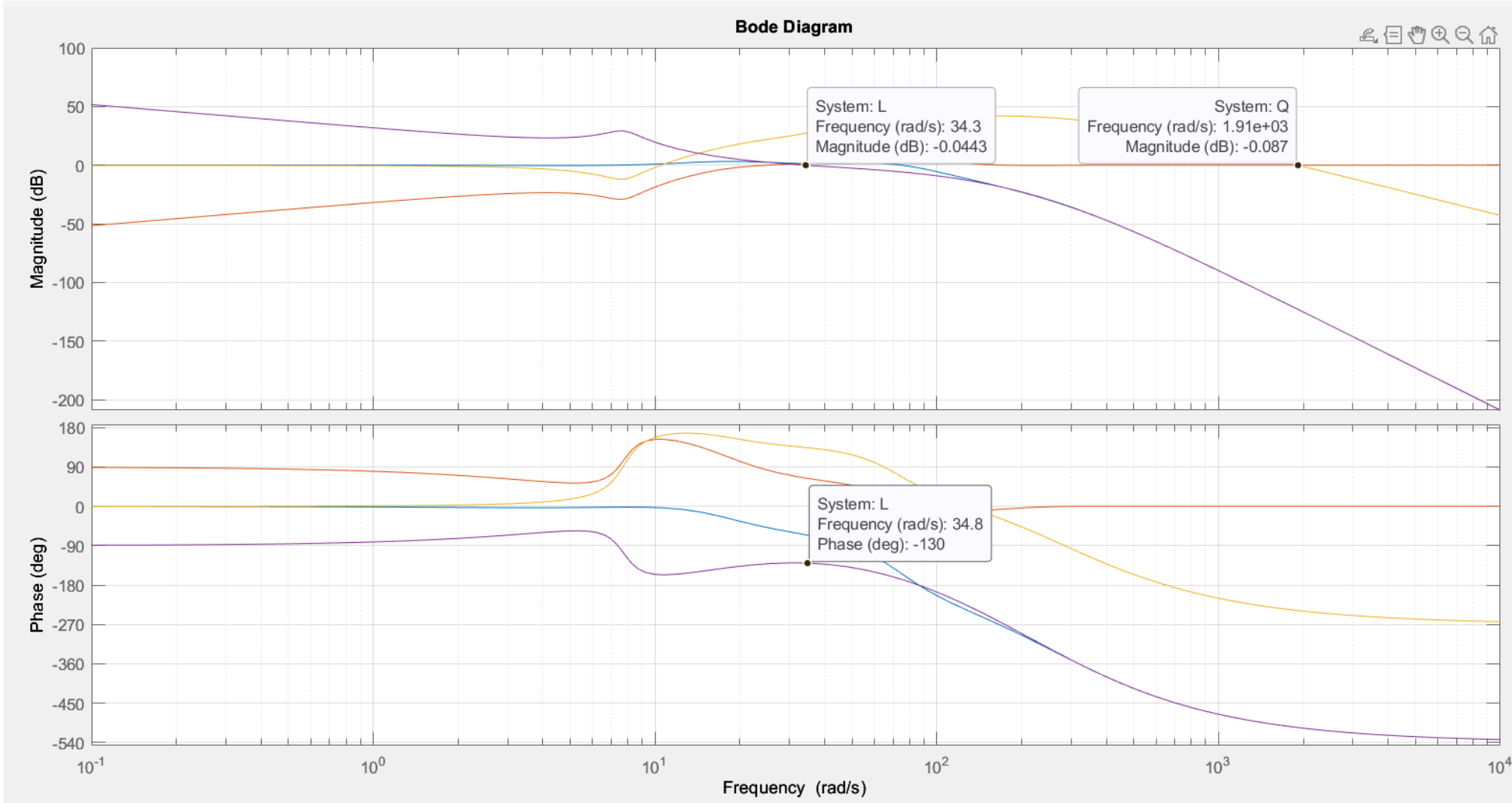
---

Dall'andamento temporale dell'uscita del regolatore  $u(t)$  si notano dei picchi fino a 2,3 volte il riferimento durante la fase transitoria

per cui bisogna sovradimensionare l'attuatore tenendo conto di questi picchi, dando tolleranze ai componenti del sistema almeno 2,3 volte superiori al riferimento.

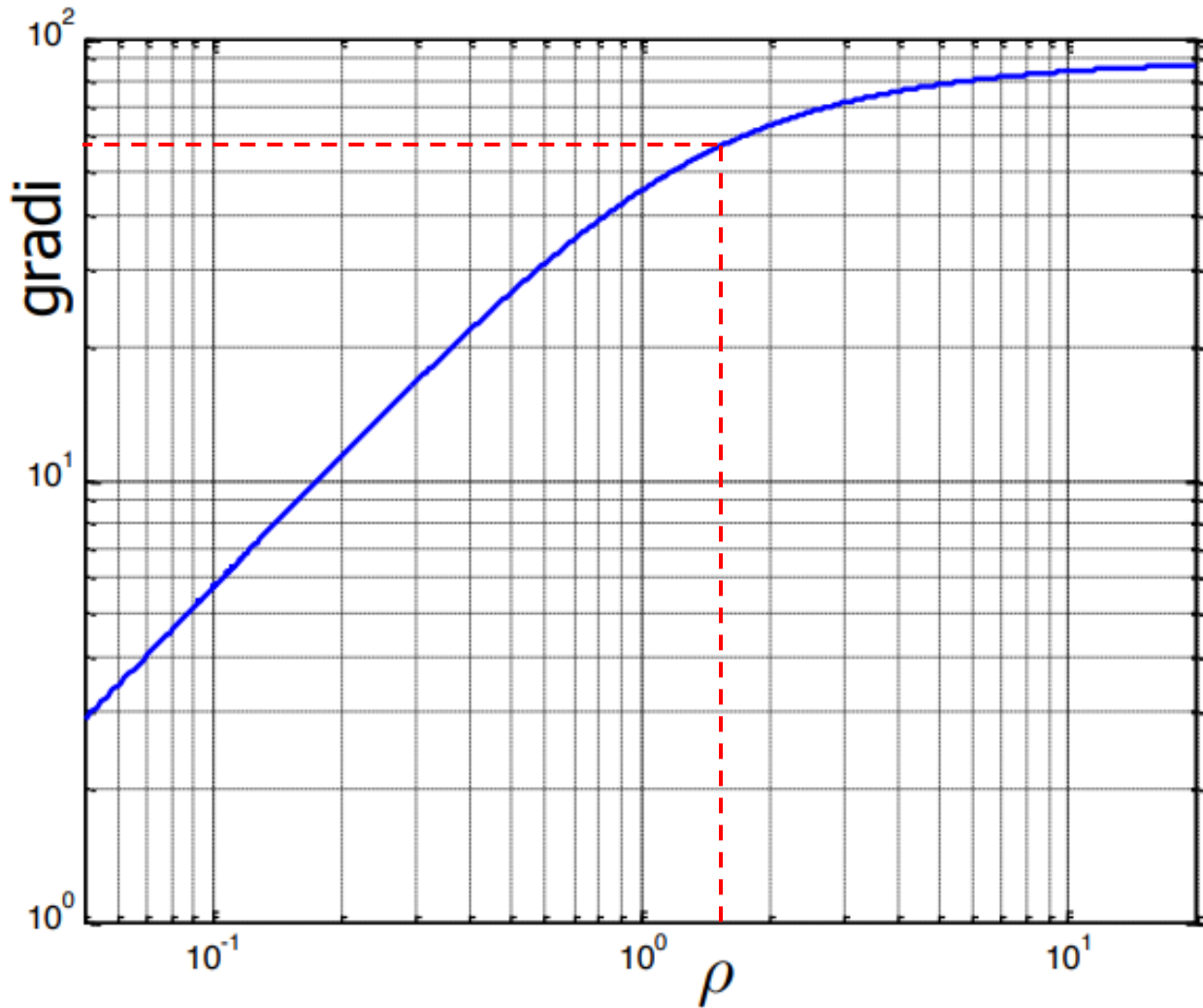
Inoltre vi è un picco negativo dovuto al disturbo a gradino sull'uscita, che deve essere considerato magari con un circuito di recupero energetico come un ramo di frenatura, per evitare danneggiamenti all'attuatore stesso.

# Funzioni di sensitività





## Per trovare il Rho



Per trovare il Rho corretto ho utilizzato il grafico presente sulle slide delle reti correttive.

Utilizzando 3 zeri per la rete divido per 3 lo sfasamento  $\varphi$  che devo applicare:

$$\frac{172}{3} = 57,33$$

Nel grafico allo sfasamento di  $57,33^\circ$  corrisponde una  $\rho \approx 6,5$