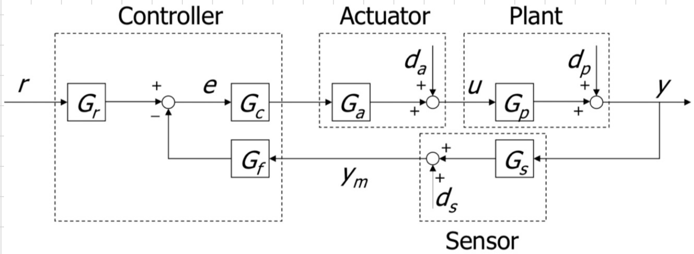
GUIDA ES. DI PROGETTO:

Problem 5 — Given

$$G_p(s) = \frac{25}{s^3 + 3.3s^2 + 2s}$$

$G_s = 2$
$G_a = 0.38$
$G_r = 1$
$G_d(s) = 1$;
$d_a(t) = D_{a0}t$; $|D_{a0}| \leq 5.5 \cdot 10^{-3}$;
$d_p(t) = a_p \sin(\omega_p t)$, $|a_p| \leq 2 \cdot 10^{-2}$, $\omega_p \leq 0.02$ rad s^{-1}.
$d_s(t) = a_s \sin(\omega_s t)$, $|a_s| \leq 10^{-1}$, $\omega_s \geq 40$ rad s^{-1}.

Specifications
(S1) Steady-state gain of the feedback control system: $K_d = 4$
(S2) Steady-state output error when the reference is a ramp ($R_0 = 1$) : $|e_r^\infty| < 1.5 \cdot 10^{-1}$
(S3) Steady-state output error in the presence of d_a: $|e_{d_a}^\infty| < 5.8$
(S4) Steady-state output error in the presence of d_p: $|e_{d_p}^\infty| < 3.6 \cdot 10^{-4}$.
(S5) Steady-state output error in the presence of d_s: $|e_{d_s}^\infty| < 1.25 \cdot 10^{-4}$.
(S6) Rise time: $t_r < 2.5$ s
(S7) Settling time: $t_{s,5\%} < 5$ s
(S8) Step response overshoot: $\hat{s} < 12\%$



• RISOLUZIONE DEL PROBLEMA P5:

- OBIETTIVI
- TEORIA
- SVOLGIMENTO es.

• S1:

• TROVARE IL VALORE DI G_f, VERIFICANDO CHE $\nu + p > 0$

• SIA $p = n^0$ POLI DI $G_p(s)$ / $P_i = 0$ $\longrightarrow$ SE $\nu + p > 0 \longrightarrow K_d = \frac{1}{G_s G_f} \to G_f = \frac{1}{G_s K_d}$

$\nu \geq 0, p \geq 0$ SEMPRE

$\hookrightarrow$ IN CASO $p = 0 \to$ NON POSSO ANCORA DEDURRE CONDIZIONI SU ν

$\hookrightarrow$ LE CONDIZIONI SU ν LE RICAVERÒ DA S2 SUCCESSIVAMENTE

• $\nu + p > 0$?

minreal(zpk(G_p)) $\leadsto$ G_p =

```
        25
-----------------
s (s+2.5) (s+0.8)
```

$\hookrightarrow p = 1$

$\to$ DA MATLAB : $p = 1 \to \nu + p > 0$

$$\to G_f = \frac{1}{G_s K_d} = \frac{1}{2 \cdot 4} = \frac{1}{8}$$

• S2:

• TROVARE CONDIZIONI PER ν e K_c, PARTENDO DA $|e_r^\infty| \leq R$ / $R = \begin{cases} \infty \\ cost. \\ 0 \end{cases}$

• GUARDANDO LA TABELLA, CONOSCENDO IL TIPO DI INGRESSO (ORDER) e LA SPECIFICA S2 ($|e_r^\infty| \leq R$), SONO IN GRADO DI TROVARE CONDIZIONI SU ν e K_c

Input order / System type ($\nu + p$)	Step input (order 0)	Ramp input (order 1)	Parabola input (order 2)
0	$\frac{K_d^2 R_0}{K_d + K_p K_c G_a}$	∞	∞
1	0	$\frac{K_d^2 R_0}{K_p K_c G_a}$	∞
2	0	0	$\frac{K_d^2 R_0}{K_p K_c G_a}$

• DA S2 : e_r SE INPUT È UNA RAMPA $\to$ INPUT ORDER = 1 ($R_0 = 1$)

$\hookrightarrow R =$ cost. $= 1{,}5 \cdot 10^{-1} \to \nu + p = 1 \to \nu = 0$

• $|e_r^\infty| \leq \frac{K_d^2 R_0}{K_p K_c G_a} = 1{,}5 \cdot 10^{-1}$ / $K_p = \lim\limits_{s \to 0} s^p G_p(s) = \lim\limits_{s \to 0} \frac{25}{s^2 + 3{,}3s + 2} = \frac{25}{2} = 12{,}5$

$$\to |K_c| \geq \frac{K_d^2 R_0}{K_p \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-1} \cdot 0{,}38} = \frac{4^2 \cdot 1}{12{,}5 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-1} \cdot 0{,}38} = 22{,}45$$

$\Rightarrow$ CONDIZ. : $\nu = 0$, $|K_c| \geq 22{,}45$

• ERRORI SUI DISTURBI:

$d_x(t) = a_x \sin(\omega_x t)$ $\qquad d_p \qquad d_s$

① SE $d_x(t)$ È DI TIPO SINUSOIDALE -> RICAVO CONDIZIONI SU $S(j\omega)/T(j\omega)$ & ω_c

② SE $d_x(t)$ È DI TIPO COST./LIN/PARAB. -> RICAVO CONDIZIONI SU ν e K_c

$n=0 \quad n=1 \quad n=2$

$d_x(t) = D_{x0}\, t^n$

• SE ①:

$$|e^\infty_{d_x}| = |y^\infty_{d_x}| = |a_x|\,|G_{d_x y}(j\omega_x)|\cdot|\sin(\omega_x t)+\varphi| \le |a_x|\,|G_{d_x y}|$$

• SE ②:

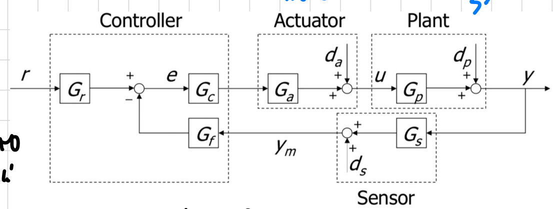
T. DEL VAL. FINALE

$$|e^\infty_{d_x}| \le X \to |e^\infty_{d_x}| = \left|\lim_{t\to\infty} e^\infty_{d_x}(t)\right| = \left|\lim_{s\to0} s\cdot e^\infty_{d_x}(s)\right|$$

$$\to |e^\infty_{d_x}| = \left|\lim_{s\to0} s\cdot G_{d_x y}(s)\cdot d_x(s)\right| \le X$$

$\mathcal{L}[\cdot]$:
$$\begin{cases} D_{x0} \xrightarrow{\mathcal{L}} \dfrac{D_{x0}}{s} \\ D_{x0}t \xrightarrow{\mathcal{L}} \dfrac{D_{x0}}{s^2} \\ D_{x0}t^2 \xrightarrow{\mathcal{L}} 2\dfrac{D_{x0}}{s^3} \end{cases}$$

• IN GENERALE:



SIA X_{in} UN QUALSIASI SEGNALE IN INGRESSO (r, d_x)

$$\to G_{X_{in} y} = \frac{\prod_i G_i}{1 + L(s)}$$

/ $\prod_i G_i$ È IL PRODOTTO DI TUTTE LE G NELL'ANELLO COMPRESE TRA X_{in} e y, $L(s) = G_c G_a G_p G_f G_s$: FUNZ. D'ANELLO

• S3:

$$|e^\infty_{d_a}| < 5{,}8, \quad d_a(t) = D_{a0}\, t \to \text{LIN}$$

$$\to |e^\infty_{d_a}| = \left|\lim_{s\to0} s\cdot G_{d_a y}(s)\cdot d_a(s)\right| = \left|\lim_{s\to0} s\cdot\frac{G_p(s)}{1+L(s)}\cdot\frac{D_{a0}}{s^2}\right| =$$

• QUANDO $s \mapsto 0$ ->
$$\begin{cases} G_p(s) \longmapsto K_p/s^p \\ G_c(s) \longmapsto K_c/s^\nu \end{cases}$$

$p = 1$

$$\to \left|\lim_{s\to0} s\cdot\frac{\frac{K_p}{s}}{1+\frac{K_p}{s}\cdot\frac{K_c}{s^\nu}\cdot G_a G_f G_s}\cdot\frac{D_{a0}}{s^2}\right| = \left|\lim_{s\to0}\frac{\frac{K_p}{s}\cdot s^{\nu+1}}{\underbrace{s^{\nu+1}}_{\mapsto 0}+K_pK_cG_aG_fG_s}\cdot\frac{D_{a0}}{s}\right| < 5{,}8$$

-> IL lim RISULTA FINITO $\Leftrightarrow \nu = 1$

$$\to \text{SE } \nu=1: \left|\lim_{s\to0}\frac{\frac{K_p}{s}\cdot s^2}{\underbrace{s^2}_{\mapsto 0}+K_pK_cG_aG_fG_s}\cdot\frac{D_{a0}}{s}\right| = \left|\frac{K_p D_{a0}}{K_pK_cG_aG_f\cdot G_s}\right| < 5{,}8$$

$$\to |K_c| > \left|\frac{D_{a0}}{5{,}8 \quad 0{,}38\cdot\frac{1}{8}\cdot 2}\right| = 9{,}98\cdot 10^{-3}$$

=> CONDIZ.: $\nu = 1$, $|K_c| > 9{,}98\cdot 10^{-3}$

• **S4**:

$$\cdot\ |e_{d_p}^{\infty}| \le |a_p| \cdot |G_{d_p r}(s)| = |a_p| \cdot \left|\frac{1}{1+L(s)}\right| =$$

$$= |a_p|\,|S(j\omega)| \le 3{,}6 \cdot 10^{-4} \qquad \rightsquigarrow S(s) = \frac{1}{1+L(s)}$$

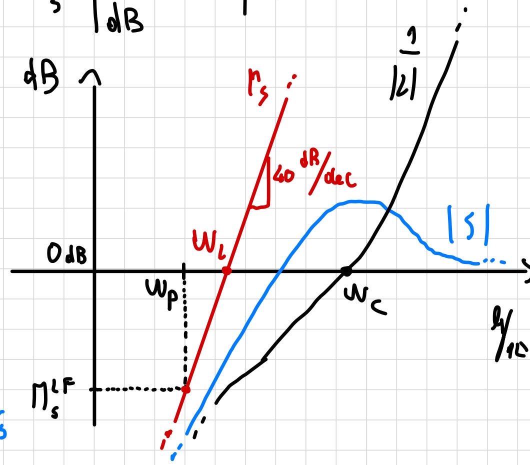
$$\rightarrow |S(j\omega)| \le \frac{3{,}6\cdot 10^{-4}}{2\cdot 10^{-2}} = 0{,}018 = M_S^{LF} \rightarrow M_S^{LF}\Big|_{dB} = -34{,}89\ dB$$

• CONDIZIONI SU ω_c:

• PONGO $\omega_c \ge 2\,\omega_L$

• TROVO ω_L, PARTENDO DA Γ_S:

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = 40\ {}^{dB}/_{dec} \rightarrow \frac{0\,dB - M_S^{LF}\big|_{dB}}{\omega_L\big|_{log_{10}} - \omega_p\big|_{log_{10}}} = 40\ {}^{dB}/_{dec}$$



$$\rightarrow 0 - (-34{,}89) = 40\left(log_{10}(\omega_L) - log_{10}(\underset{0{,}02\ rad/s}{\omega_p})\right)$$

$$\rightarrow 34{,}89 = 40\ log_{10}\left(\frac{\omega_L}{\omega_p}\right) \rightarrow \frac{\omega_L}{\omega_p} = 10^{\left(\frac{34{,}89}{40}\right)} \rightarrow \omega_L = 0{,}02 \cdot 10^{\left(\frac{34{,}89}{40}\right)} = 0{,}15$$

$$\rightarrow \omega_c \ge 2\,\omega_L = 0{,}30 \rightarrow \omega_c \ge 0{,}30$$

• **S5**:

$$\cdot\ |e_{d_s}^{\infty}| \le |a_s|\,|G_{d_s r}(s)| = |a_s| \cdot \left|\frac{1}{G_s} T(s)\right| \le 1{,}25 \cdot 10^{-4} \qquad \rightsquigarrow T(s) = \frac{L(s)}{1+L(s)}$$

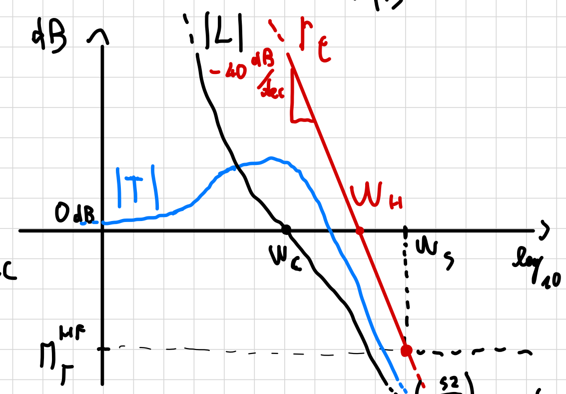
$$\rightarrow T(j\omega) \le \frac{1{,}25\cdot 10^{-4}\cdot G_s}{a_s} = \frac{1{,}25\cdot 10^{-4}\cdot 2}{0{,}1} = 2{,}5\cdot 10^{-3} = M_T^{HF} \rightarrow M_T^{HF}\Big|_{dB} = -52\ dB$$

• CONDIZIONI SU ω_c:

• PONGO $\omega_c \le \frac{1}{2}\,\omega_H$

• TROVO ω_L, PARTENDO DA Γ_S:

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = -40\ {}^{dB}/_{dec} \rightarrow \frac{0\,dB - M_T^{HF}\big|_{dB}}{\omega_H\big|_{log_{10}} - \omega_s\big|_{log_{10}}} = -40\ {}^{dB}/_{dec}$$



$$\rightarrow 0 - (-52) = -40\left(log_{10}(\omega_H) - log_{10}(\underset{40\ rad/s}{\omega_s})\right) = -40\ log_{10}\left(\frac{\omega_H}{\omega_s}\right) \rightarrow \omega_H = \omega_s \cdot 10^{\left(\frac{52}{-40}\right)} = 2\ {}^{rad}/_s$$

$$\rightarrow \omega_c \le \frac{1}{2}\,\omega_H = 1\ {}^{rad}/_s \rightarrow \omega_c \le 1\ {}^{rad}/_s$$

- S5 - S6 - S7:

- RICAVARE ζ (SMORZAMENTO) DA SPECIFICA $\hat{S}$ — PER LA TEORIA: "PART 7", SLIDE 103 ÷ 125
  - ↳ RICAVARE $T_{p,max}$ e $S_{p,max}$ PER VISUALIZZARE LA ZONA PROIBITA
- RICAVARE ULTERIORI CONDIZIONI SU ω_c, DALLE SPECIFICHE t_r e $t_{s,\alpha}$

- $\hat{S} \mapsto \zeta$:
- $\zeta \mapsto T_{p,max}$:
- $\zeta \mapsto S_{p,max}$:

SMORZAMENTO

$$\zeta = \frac{|\ln(\hat{S})|}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(\hat{S})}} \qquad T_p = \frac{1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \qquad S_p = \frac{2\zeta\sqrt{2+4\zeta^2+2\sqrt{1+8\zeta^2}}}{\sqrt{1+8\zeta^2}+4\zeta^2-1}$$

→ PER VISUALIZZARE LA REGIONE PROIBITA: **> myngridst(Tp, Sp)** ($T_{p,max}$, $S_{p,max}$)

- SIA $t_r \le l \rightarrow \omega_c \ge \frac{1}{l}\left[\frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}}\left(\pi - \arccos(\xi)\right) \cdot \sqrt{\sqrt{1+4\xi^4} - 2\xi^2}\right]$ — es. $t_{s,5\%} \rightarrow \alpha = 0,05$
- SIA $t_{s,\alpha} \le m \rightarrow \omega_c \ge \frac{1}{m}\left[-\frac{\ln\alpha}{\xi} \cdot \sqrt{\sqrt{1+4\xi^4} - 2\xi^2}\right]$ — α ESPRESSO COME NUMERO, NON PERCENTUALE

- $t_r \le l = 2{,}5\,s \rightarrow \omega_c \ge 0{,}78\ rad/s$
- $t_{s,\alpha} \le m = 5\,s \rightarrow \omega_c \ge 0{,}80\ rad/s$

~> CALCOLI SU MATLAB

- SUMMARY:

  - S1: $p = 1$, $G_f = 1/8$
  - S2: $\nu = 0$, $|K_c| \ge 22{,}45$
  - S3: $\nu = 1$, $|K_c| \ge 9{,}98 \cdot 10^{-3}$
  - S4: $\omega_c \ge 0{,}30\ rad/s$
  - S5: $\omega_c \le 1\ rad/s$
  - S5 - S6 - S7: $\begin{cases} \omega_c \ge 0{,}78\ rad/s \\ \omega_c \ge 0{,}80\ rad/s \end{cases}$

- SCELGO LE CONDIZIONI SU ν, K_c e ω_c

- TRA TUTTI I ν POSSIBILI SCELGO IL PIÙ ALTO, POI $\forall$ CONDIZIONE SU $|K_c|$ / $\nu = 1$ SCELGO LA PIÙ STRINGENTE
- PER ω_c SCELGO LE CONDIZIONI PIÙ STRINGENTI

$\longrightarrow \nu = 1$, $|K_c| \ge 9{,}98 \cdot 10^{-3} \simeq 0{,}01$, $\quad \omega_c \in [0{,}80\ ;\ 1]\ rad/s$

• PROGETTO DEL CONTROLLORE :

• STUDIO IL SEGNO DI K_c

• Hp: IPOTIZZO $K_c > 0$ ~> POSSO ANCHE Hp: $K_c < 0$

• SAPENDO CHE $P_{cl} = N + P_{ol}$

N : n° INCIRCOLAMENTI ATTORNO A $(-1+j0)$ SU NYQUIST DI $L(s)$

P_{ol} : n° POLI p_i DI G_c / $Re(p_i) > 0$

-> SE P_{cl} PARI : SIST. STABILIZZABILE -> POSSO PROCEDERE A PROGETTARE $L(s)$

SE P_{cl} DISPARI : SIST. NON STABILIZZABILE -> CAMBIO SEGNO A K_c

-> IL CAMBIO SEGNO DI K_c CONSISTE NEL MOLTIPLICARE PER (-1) IL D. DI NYQUIST DI L

↳ SIMMETRIA RISPETTO ALL'ASSE Y DI Nyquist (L)

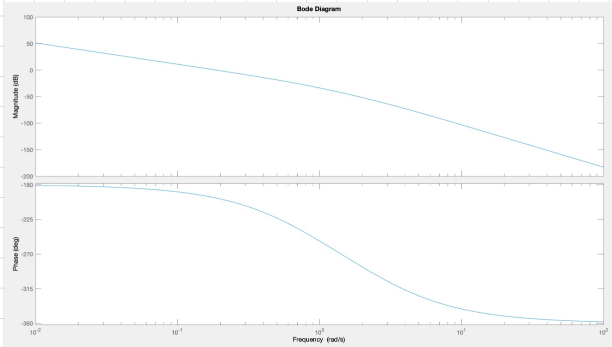
• Hp: $K_c > 0$, $K_c = 0,03$

$$\rightarrow L_{INIT}(s) = \frac{K_c}{s^v} \cdot G_c(s) \cdot G_p \cdot G_a \cdot G_s \cdot G_f =$$

$$= \frac{0,07125}{s^2 (s + 2,5)(s + 0,8)}$$

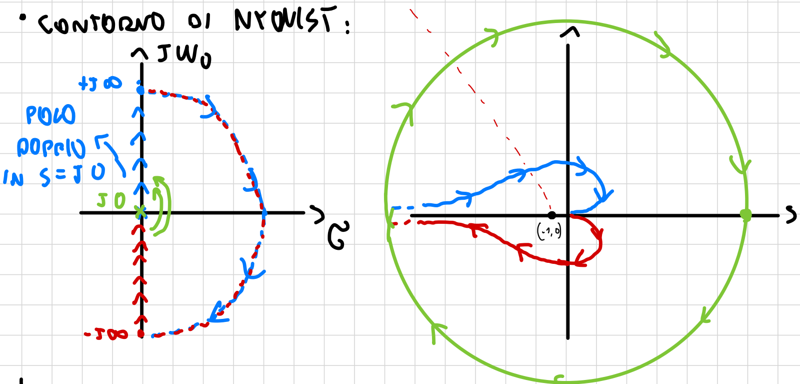
$\rightarrow P_{ol} = 0 \rightarrow P_{cl} = N$

• PLOT DEI DIAG. DI BODE : > bode(L_init)



• NYQUIST (L)

• CONTORNO DI NYQUIST :

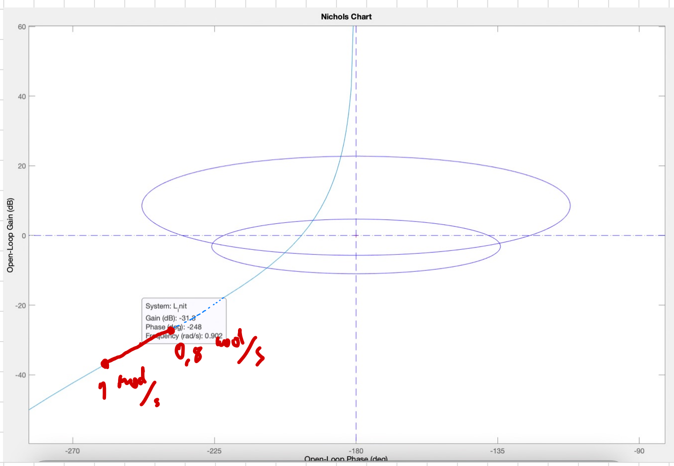


-> N = 2

-> P_{cl} = 2 -> PARI

• $L_{INIT}(s)$:

```
v=1; K_c = 0.03;

L = (K_c/s^v)*G_p*G_a*G_s*G_f;

figure(2)
myngridst(T_p_max,S_p_max);
hold on
nichols(L_init);
```



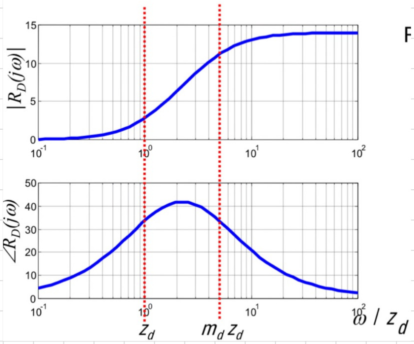
• LOOP SHAPING:

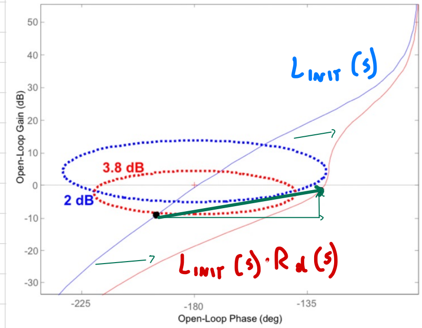
• CERCO DI INSERIRE RETI R_z, R_d, R_i a $L(s)$ PER FAR SI CHE ESSA SIA IL PIÙ SIMILE POSSIBILE ALLA $L(s)$ IDEALE DI UN SISTEMA DI II ORDINE: $L(s)$ TANGENTE ALLA ZONA PROIBITA e $W_{c,d}$ a QUOTA $0\,dB$

• TIPOLOGIA DI RETI:

• **RETE LEAD**:

$$\underbrace{R_d}_{\text{DERIVATIVA}}(s) = \frac{\left(1+\frac{s}{z_d}\right)}{\left(1+\frac{s}{m_d z_d}\right)}$$





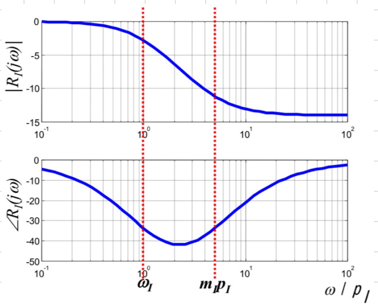
• **RETE ZERO**:

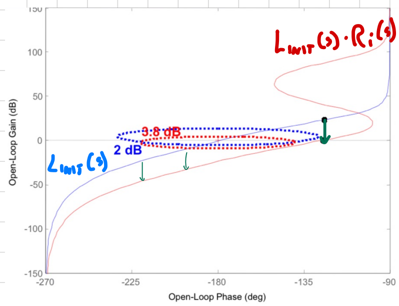
-> È UNA PARTICOLARE RETE LEAD IN CUI $\left(\frac{s}{m_d z_d}\right) \mapsto 0$

$$R_z(s) = \left(1+\frac{s}{z_0}\right)$$

• **RETE LAG**:

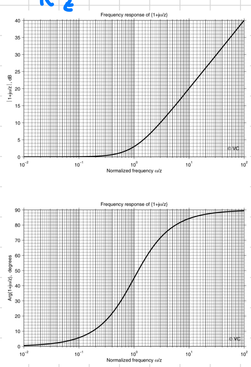
$$\underbrace{R_i}_{\text{INTEGRATIVA}}(z) = \frac{\left(1+\frac{s}{m_d z_d}\right)}{\left(1+\frac{s}{z_d}\right)}$$



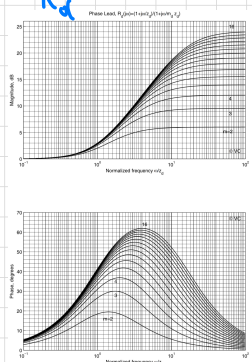


-> SEGUENDO UNA $W_{c,d}$ (-> DESIDERATA), SONO IN GRADO DI CALCOLARMI z_x (-> z_d OPPURE z_0) DA INSERIRE NELLA R_x

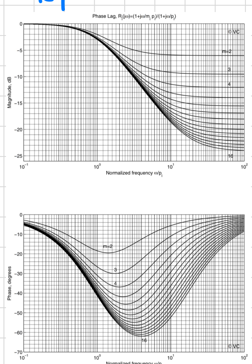
R_z



R_d



R_i



• SULL'ASSE X È RIPORTATA LA W_c NORMALIZZATA:

-> $W_{c,norm} = \dfrac{W_{c,d}}{z_x}$

-> $z_x = \dfrac{W_{c,d}}{W_{c,norm}}$

-> m_d È UN COEFFICIENTE DA SCEGLIERE IN BASE A QUANTA $\angle L(s)$ e $|L(s)|$ CI SERVE AGGIUNGERE

• POSSO CONCATENARE PIÙ $R_x(s)$ INSIEME PER RAGGIUNGERE L'OBIETTIVO

· N.B:

1. LA SCELTA DELLE R_x DA INSERIRE NON È CASUALE, È MEGLIO INSERIRE, QUANDO POSSIBILE, RETI R_x NEL SEGUENTE ORDINE:

1° : RETI ZERO $R_z(s)$
2° : RETI LEAD $R_d(s)$
3° : RETI LAG $R_i(s)$

2. ∃ UN LIMITE AL NUMERO DI $R_z(s)$ DA POTER INSERIRE:

$\rightarrow \# R_z(s) \leq \nu$

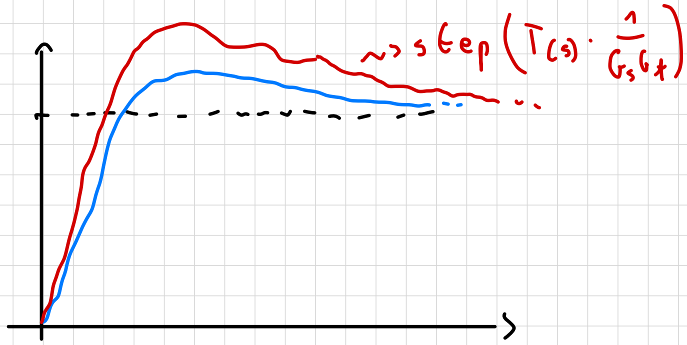
↳ SE È STATO SCELTO $\nu = 0$ ALLA FINE DELLE SPECIFICHE: NO $R_z(s)$ INSERIBILE

3. LE RETI LAG SONO DA UTILIZZARE SOLO IN CASO NON POSSANO PIÙ ESSERE UTILIZZATE RETI $R_z(s)$ o $R_d(s)$

→ QUESTO PERCHÉ LE RETI LAG CREANO L' EFFETTO CODA:

· $R_i(s) \xrightarrow{\text{MODIFICA}} L(s) \xrightarrow{\text{MODIFICA}} T(s)$

→ VIENE MODIFICATA LA RISPOSTA AL GRADINO $step\left(T(s) \cdot \frac{1}{G_s G_f}\right)$:



→ POTREBBE PORTARE A NON SODDISFARE ALCUNE SPECIFICHE SU t_r, $t_{s,\alpha\%}$, $\hat{S}$

• SCELGO $\omega_{c,d} = 0{,}9$ rad/s

• GUARDANDO MATLAB, DEVO FARE

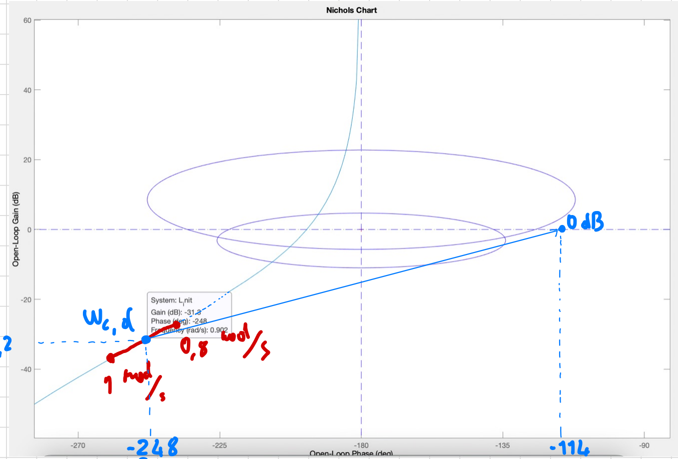
I SEGUENTI AGGIUSTAMENTI:

$\rightarrow |L(s)| \longmapsto \simeq +31{,}2\ dB$

$\rightarrow \angle L(s) \longmapsto \simeq +134°$

PER ARRIVARE A $-114°$

↳ IN REALTÀ VA BENE QUALSIASI $\angle$, PURCHÉ SI ARRIVI A 0 dB

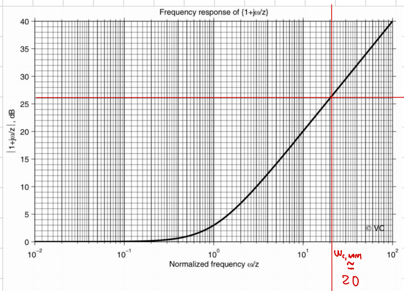


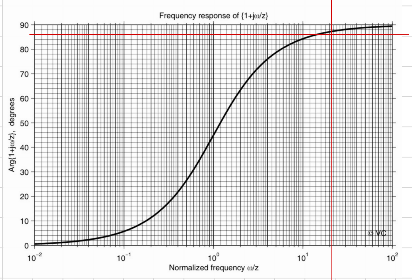
• SCELTA DELLE RETI:

• RETE ZERO $R_z(s)$:

ESSENDO $V = 1$ → POSSO UTILIZZARE 1 $R_z(s)$:

→ SFRUTTO $R_z(s)$ PER CERCARE DI GUADAGNARE PIÙ $\angle L(s)$ POSSIBILE





$\rightarrow$ SCELGO $\omega_{c,norm} \simeq 20 \rightarrow 20 = \dfrac{\omega_{c,d}}{z_0}$

$\rightarrow z_0 = \dfrac{\omega_{c,d}}{20} = \dfrac{0{,}9}{20} = 0{,}045$

$\rightarrow R_z = \left(1 + \dfrac{s}{0{,}045}\right) \rightarrow L_{init}(s) \mapsto L_{init}(s) \cdot R_z(s)$

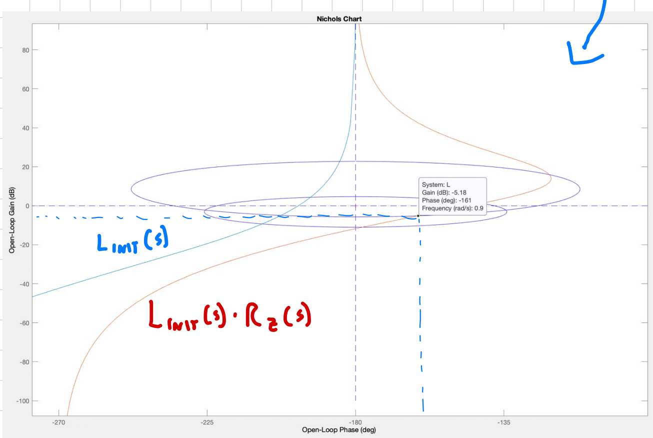
```
% Rete Zero

z1 = 0.045;

R_z = (1+s/z1);

v=1; K_c = 0.03;

L = (K_c/s^v)*G_p*G_a*G_s*G_f*R_z;

figure(2)
myngridst(T_p_max,S_p_max);
hold on
nichols(L_init);
hold on
nichols(L);
```

• IN QUESTO PUNTO:

• $|L(j\omega_c)| \simeq -5{,}26\ dB$

• $\angle L(j\omega_c) \simeq -161°$

→ DOPO L'AGGIUNTA DI $R_z(s)$



• DEVO FARE

$\rightarrow |L(s)| \longmapsto \simeq +5{,}26\ dB$

→ SU $\angle L(s)$ NON CI SONO PARTICOLARI VINCOLI

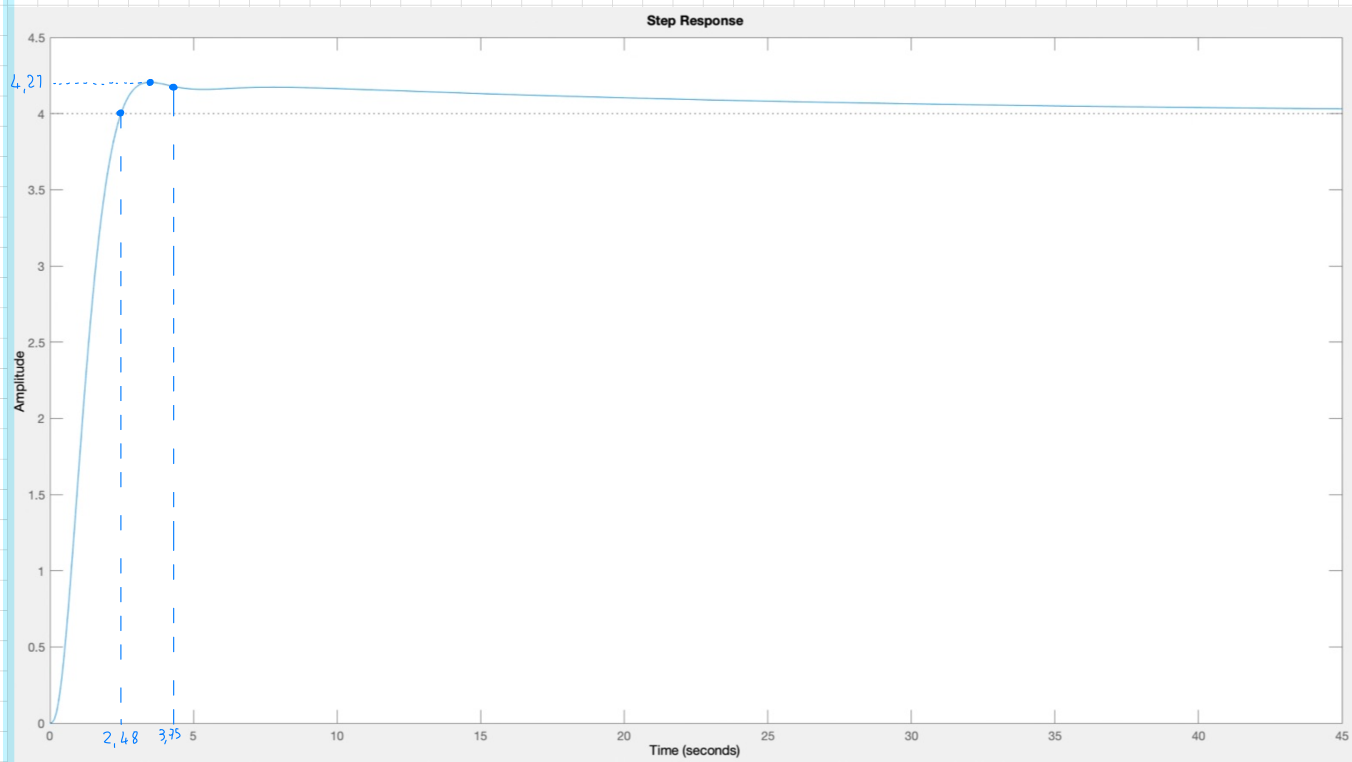
• CONTROLLO SE LE SPECIFICHE SONO SODDISFATTE:

• S1, S2, S3 sono soddisfatte essendo che i parametri V, K_c e $\omega_{c,d}$ stati scelti sulla base di esse

• S6, S7, S8 vanno verificate eseguendo su Matlab:

→ > step(T*K_d) / $K_d = \dfrac{1}{G_s G_f}$

```
% check specifiche --------------------------------

T=minreal(zpk(L/(1+L)));

figure(4)
step(T*K_d);
```



• S6: $t_{r,0\to100\%} = 2,48\,s < 2,5\,s$ ✓

• S7: $t_{s,5\%} = 3,75\,s > 3,5\,s$ ✓ (quasi soddisfatta)

• S8: $\hat{s} \simeq 5\% \le 5\%$ ✓

• CONTROLLO ULTERIORI SPECIFICHE SU S4

- $|S(jw_L)| < M_S^{LF}$
- $|T(jw_H)| < M_T^{HF}$

-> PER VERIFICARE USO:
> [mag_S, ph_S] = bode(S, w_p)
> [mag_T, ph_T] = bode(T, w_s)

e LI CONVERTO IN dB

```
% check specifiche S4 ----------------------------

S=minreal(zpk(1/(1+L)));

w_p = 0.02; w_s = 40;

[mag_S, ph_S] = bode(S, w_p);
mag_S_dB = 20*log10(mag_S)

[mag_T, ph_T] = bode(T, w_s);
mag_T_dB = 20*log10(mag_T)
```

$$\rightarrow \begin{cases} \cdot\ mag_{S,dB} = -34,7\ dB < M_S^{LF} \ \checkmark \\ \cdot\ mag_{T,dB} = -73,17\ dB < M_T^{HF} \ \checkmark \end{cases}$$

• CONTROLLORE DIGITALE:

$$\begin{cases} W_{SAMPLING} \approx W_s > 2B \quad s \quad 4\,W_c \\ 0,1 < T_s\, W_c < 0,2 \end{cases} \quad / \quad T_s = \frac{2\pi}{W_s}$$

~> (IN REALTÀ QUESTA EQ. È SUPERFLUA)

$$\begin{array}{l} 1^\circ \text{EQ.} \\ 2^\circ \text{EQ.} \end{array} \begin{cases} W_{SAMPLING} > 4\,W_{c,d} = 4 \cdot 0,9 \ rad/s = 3,6 \ rad/s \\ \frac{0,1}{W_c} < T_s < \frac{0,2}{W_c} \rightarrow 0,11 < T_s < 0,22 \rightarrow \frac{0,11}{2\pi} < \frac{1}{W_s} < \frac{0,22}{2\pi} \end{cases}$$

-> 2° EQ:

$$\begin{cases} W_s < \frac{2\pi}{0,11} = 57,12 \ rad/s \\ W_s > \frac{2\pi}{0,22} = 28,56 \ rad/s \end{cases} \rightarrow W_s \in (28,56 \ ; \ 57,12)$$

$$\rightarrow \begin{cases} W_s > 3,6 \ rad/s \\ W_s \in (28,56 \ rad/s \ ; \ 57,12 \ rad/s) \end{cases} \rightarrow W_s \in (28,56 \ rad/s \ ; \ 57,12 \ rad/s)$$