MARCO MAMERI 13-07-2021

DATI $G_p(s) = \dfrac{10}{s(s+50)^2}$ $G_s = 2$ $G_a = -3$

$\hookrightarrow p = 1$

DISTURBI $d_a = D_{a0}\,\varepsilon(t)$ con $|D_{a0}| \leq 222 \cdot 10^{-2}$

$d_s(t) = a_s \, \mathrm{sen}(\omega_s t)$ con $|a_s| \leq 2 \cdot 10^{-3}$, $\omega_s = 2000 \frac{rad}{s}$

SPECIFICHE

S1) $K_d = 1$

S2) $|e_r^\infty| = 0$ con GRADINO $R_0 = 1$

S3) $|e_{d_a}^\infty| = 0$

S4) $|e_{d_s}^\infty| < 10^{-5}$

S5) $t_r < 0{,}1\,s$

S6) $t_{s,5\%} < 1\,s$

S7) $\hat{S} < 10\%$

TRADUZIONE SPECIFICHE in VINCOLI di PROGETTO

S1) $K_d = 1$ DATO che ABBIAMO $p = 1 \rightarrow \nu + p > 0$, VALE $K_d = \dfrac{1}{G_s G_f}$

DA CUI $G_f = \dfrac{1}{K_d \cdot G_s} \rightarrow \boxed{G_f = \dfrac{1}{2}}$ p = POLI NELL'ORIGINE dell'IMPIANTO G_p

S2) $|e_r^\infty| = 0$ con $\underbrace{\text{STEP } (R_0 = 1)}_{\text{INPUT ORDINE ZERO}}$ in INGRESSO $\rightarrow$ ERRORE di TRACKING NULLO $\rightarrow$ SISTEMA TIPO 1

DA TABELLA su SLIDE PART 7

$\nu + p \geq 1$ ma $p = 1$,

QUINDI non ne RICAVO ALCUN VINCOLO su ν

$\rightarrow \boxed{\nu \geq 0}$

S3) $|e_{da}^{\infty}| = 0$ $\quad |e_{da}^{\infty}| = |y_{da}^{\infty}| = \left|\lim_{t\to\infty} y_{da}(t)\right| = \left|\lim_{s\to 0} s\cdot y_{da}(s)\right|$

SAPPIAMO che $y_{da}(s) = G_{day}\cdot d_a = \dfrac{G_p}{1+L}\cdot d_a$

CERCHIAMO IL VALORE di PICCO, QUINDI $d_a = |D_{ao}| \Rightarrow \mathcal{L} \Rightarrow \dfrac{D_{ao}}{s}$

$$\left|\lim_{s\to 0} \cancel{s}\cdot\frac{D_{ao}}{\cancel{s}}\cdot\frac{G_p}{1+L}\right|$$

$$\text{per } s\to 0 \to \begin{cases} G_p = \dfrac{K_P}{s^P} \\ G_c = \dfrac{K_c}{s^\nu} \end{cases}$$

con $P = 1$

$$K_P = \lim_{s\to 0} s^P G_p(s) = \lim_{s\to 0} \cancel{s}\cdot\frac{10}{\cancel{s}(s+50)^2} = \lim_{s\to 0}\frac{10}{s^2+100s+2500} = \frac{10}{2500} \simeq 0{,}004$$

$\boxed{K_P = 0{,}004}$ QUINDI

$$|e_{da}^{\infty}| = \left|\lim_{s\to 0} \frac{D_{ao}\dfrac{K_P}{s^P}}{1+\dfrac{K_P}{s^P}\dfrac{K_c}{s^\nu}G_f G_s G_a}\right|$$

$$= \left|\lim_{s\to 0}\frac{D_{ao}\dfrac{K_P}{\cancel{s^P}}\, s^{\nu+\cancel{P}}}{s^{\nu+P}+K_P K_c G_f G_s G_a}\right| = \left|\lim_{s\to 0}\frac{D_{ao}K_P s^\nu}{s^{\nu+1}+K_c K_P G_f G_s G_a}\right| = 0$$

per $\nu = 0$ sarebbe LIMITATO MA NON NULLO $\to$ $\boxed{\nu \geq 1 \quad \forall K_c}$

S4) $|e_{d_s}^{\infty}| < 10^{-5}$ con $d_s(t) = a_s \,\text{sen}(\omega_s t)$, $|a_s| \leq 2 \cdot 10^{-3}$

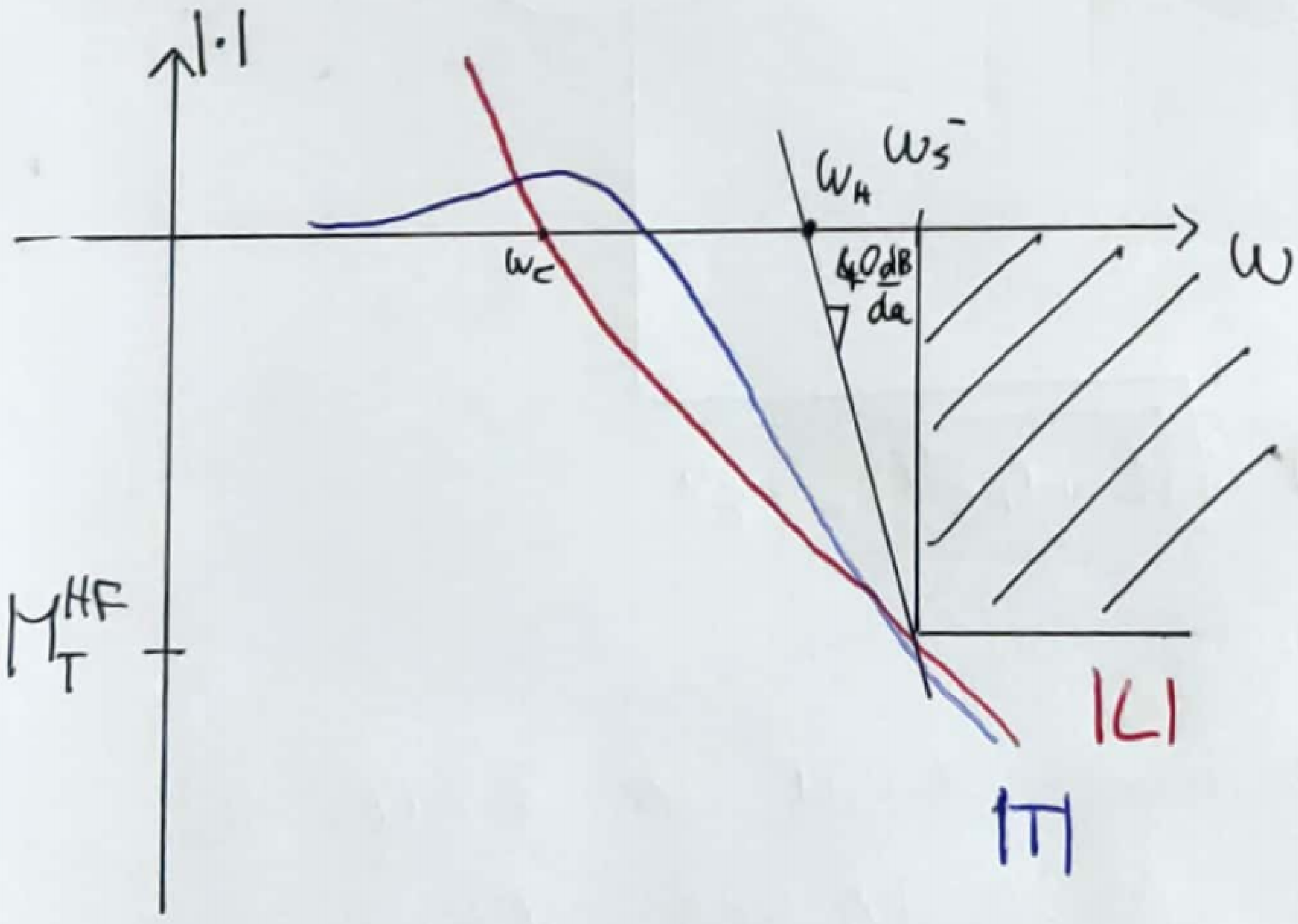
$\omega_s = 2000 \frac{rad}{s}$

$|y_{d_s}^{\infty}| = |G_{dsy} \cdot d_s|$ per $t \to \infty$, MA NON È POSSIBILE SVOLGERE IL LIMITE DATO che $d_s(t)$ NON CONVERGE, ma OSCILLA. POSSIAMO PERÒ TROVARE L'ERRORE MASSIMO nei PICCHI in MODULO del DISTURBO SINUSOIDALE

$$|e_{d_s}^{\infty}| = |y_{d_s}^{\infty}| = \Big| G_{dsy}(s) \cdot |a_s| \cdot \underbrace{\text{sen}(\omega_s t)}_{\in [-1,1] \to \text{ considero il massimo} \to =1} \Big|$$

$$= \Big| |a_s| \cdot \underbrace{\frac{L}{1+L}}_{T(j\omega)} \frac{1}{G_s} \Big| = \Big| |a_s| \cdot T(j\omega) \cdot \frac{1}{G_s} \Big| < 1 \cdot 10^{-5}$$

$$\to \quad |T(j\omega)| < \frac{G_s \cdot 10^{-5}}{|a_s|_{max}} \Rightarrow |T(j\omega)| < 0{,}01 \to \boxed{M_T^{HF} = -40dB}$$



ω_H = INTERSEZIONE con ASSE A 0dB della RETTA con PENDENZA $-40\frac{dB}{dec}$ CHE INCONTRA LO SPIGOLO M_T^{HF}

$$\omega_H = \omega_s^- \cdot 10^{\frac{M_T^{HF}}{40}} = 200 \frac{rad}{s}$$

$$\omega_{c_{max}} = \frac{\omega_H}{2} = 100 \frac{rad}{s}$$

$\cancel{\omega_c < 200 \frac{rad}{s}}$

$$\boxed{\omega_c < 100 \frac{rad}{s}}$$

Requisiti Transitorio | S7) $\hat{S} < 10\%$

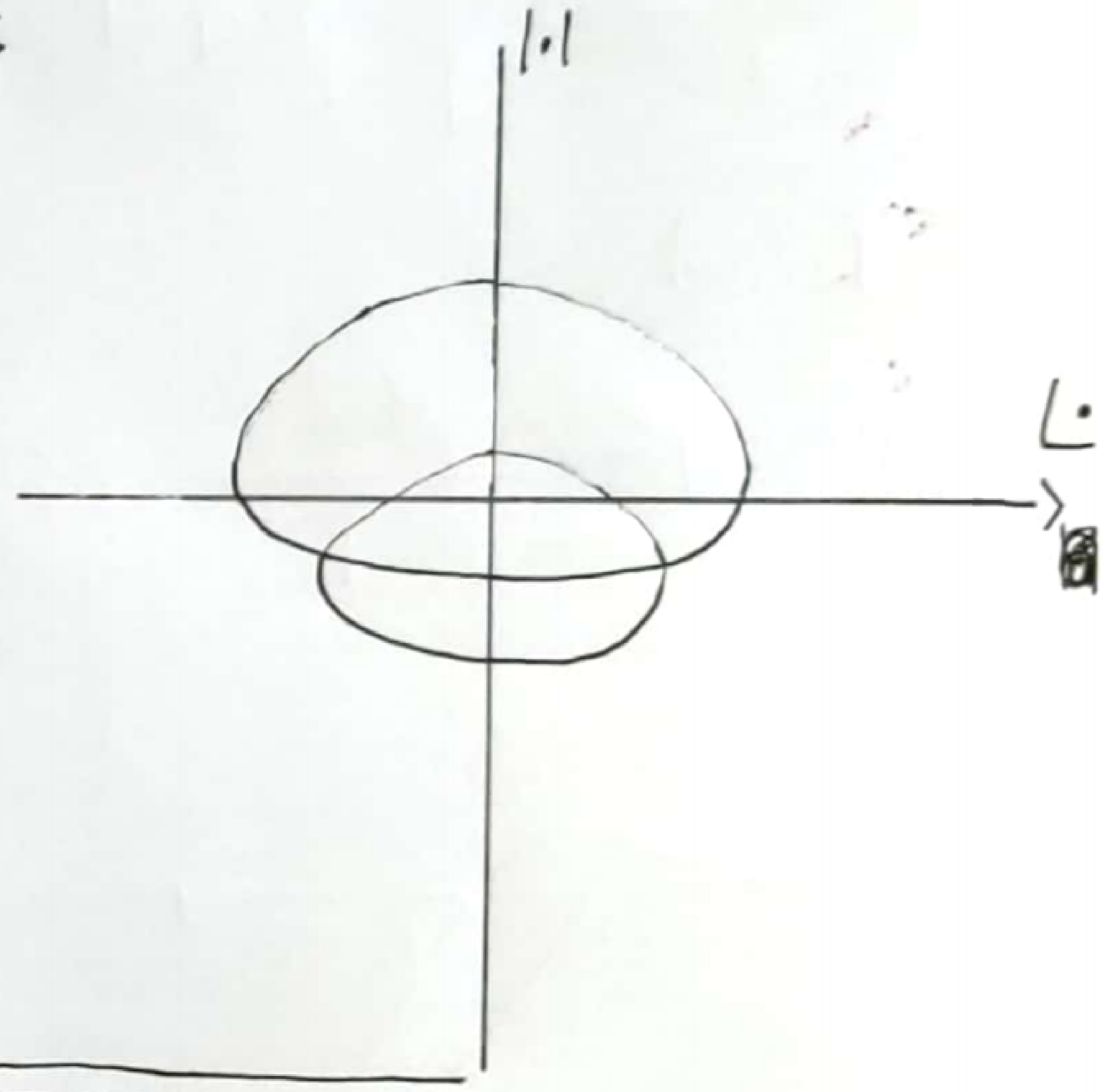
DA FORMULA su SLIDE PART 7 RICAVO LO SMORZAMENTO minimo

$$\varepsilon = \frac{|\ln(\hat{S})|}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(\hat{S})}} = \frac{|\ln(0,1)|}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(0,1)}} \rightarrow \boxed{\varepsilon = 0,5912}$$

DA CUI OTTENIAMO, GRAZIE ALLE RISPETTIVE FORMULE che NON TRASCRIVO PERCHÈ COMPLESSE,

$$\boxed{\begin{aligned} T_p &= 1,0487 \\ S_p &= 1,3611 \end{aligned}}$$

ATTRAVERSO LA FUNZIONE mynegrid.st OTTENGO L'AREA PROIBITA in Nichols



S5) $t_r < 0,1s$ TEMPO di SALITA

SEMPRE DALLE SLIDE

$$t_r \cdot \omega_c = \frac{1}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \cdot (\pi - \arccos(\varepsilon)) \sqrt{\sqrt{1+4\varepsilon^4} - 2\varepsilon^2}$$

DA CUI RICAVO una $\omega_{c\,min}$ OLTRE LA QUALE IL SISTEMA DOVREBBBE ESSERE ABBASTANZA VELOCE DA SODDISFARE IL REQUISITO su t_r

$$\boxed{\omega_c \geq 19,72 \ \frac{rad}{s}}$$

Scansionato con CamScanner

S6) $t_{s,5\%} < 1s$ ANALOGAMENTE A S5)

$$t_{s,5\%} \cdot \omega_c = \frac{-\ln(0{,}05)}{\varepsilon} \cdot \sqrt{\sqrt{1+4\varepsilon^4}-2\varepsilon^2}$$

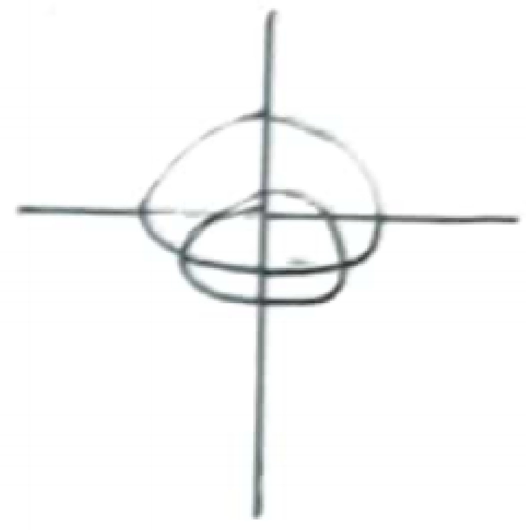
DA CUI $\boxed{\omega_c \geq 3{,}66}$ (ENTRAMBI APPROSSIMATI PER ECCESSO)

Riepilogo

S1) $G_f = \frac{1}{2}$ S2) $\nu \geq 0 \ \forall K_c$ S3) $\nu \geq 1 \ \forall K_c$

S4) $M_T^{HF} = -40dB$, $\omega_c < 100 \frac{rad}{s}$ S7) $\varepsilon = 0{,}5912$
$T_p = 1{,}0487$
$S_p = 1{,}3611$

S6) $\omega_c \geq 3{,}66 \frac{rad}{s}$ S5) $\omega_c \geq 19{,}72 \frac{rad}{s}$



Vincoli

$\omega_c \in [19.72, 100] \frac{rad}{s}$, $\nu = 1$, $\forall |K_c|$

Studio del Segno di K_c

HO $G_c(s) = \frac{K_c}{s^\nu} = \frac{K_c}{s}$ → polo in zero

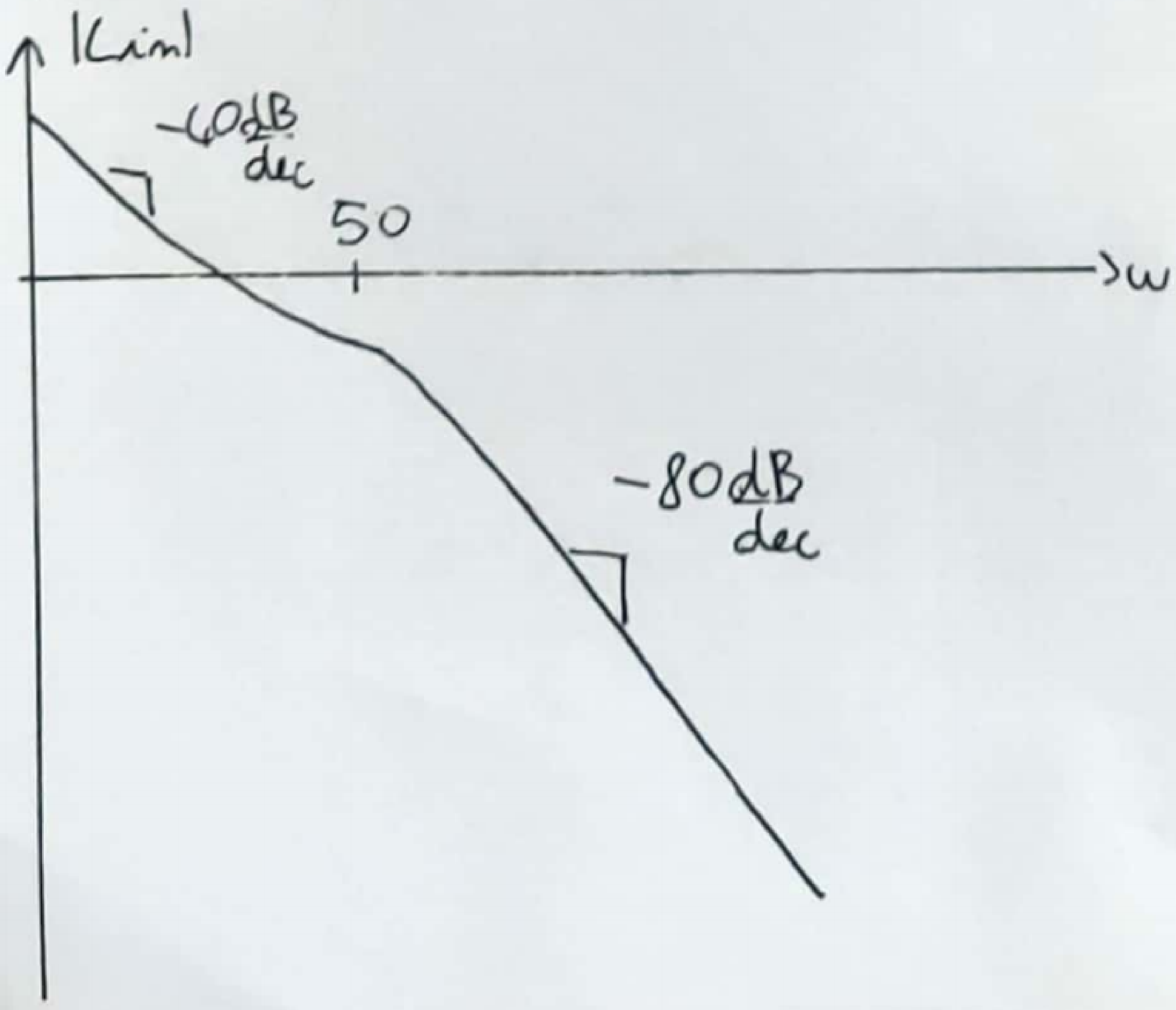
non HO VINCOLI sul MODULO di K_c, MA DEVO TROVARE IL SEGNO di K_c CHE PERMETTA di STABILIZZARE IL SISTEMA

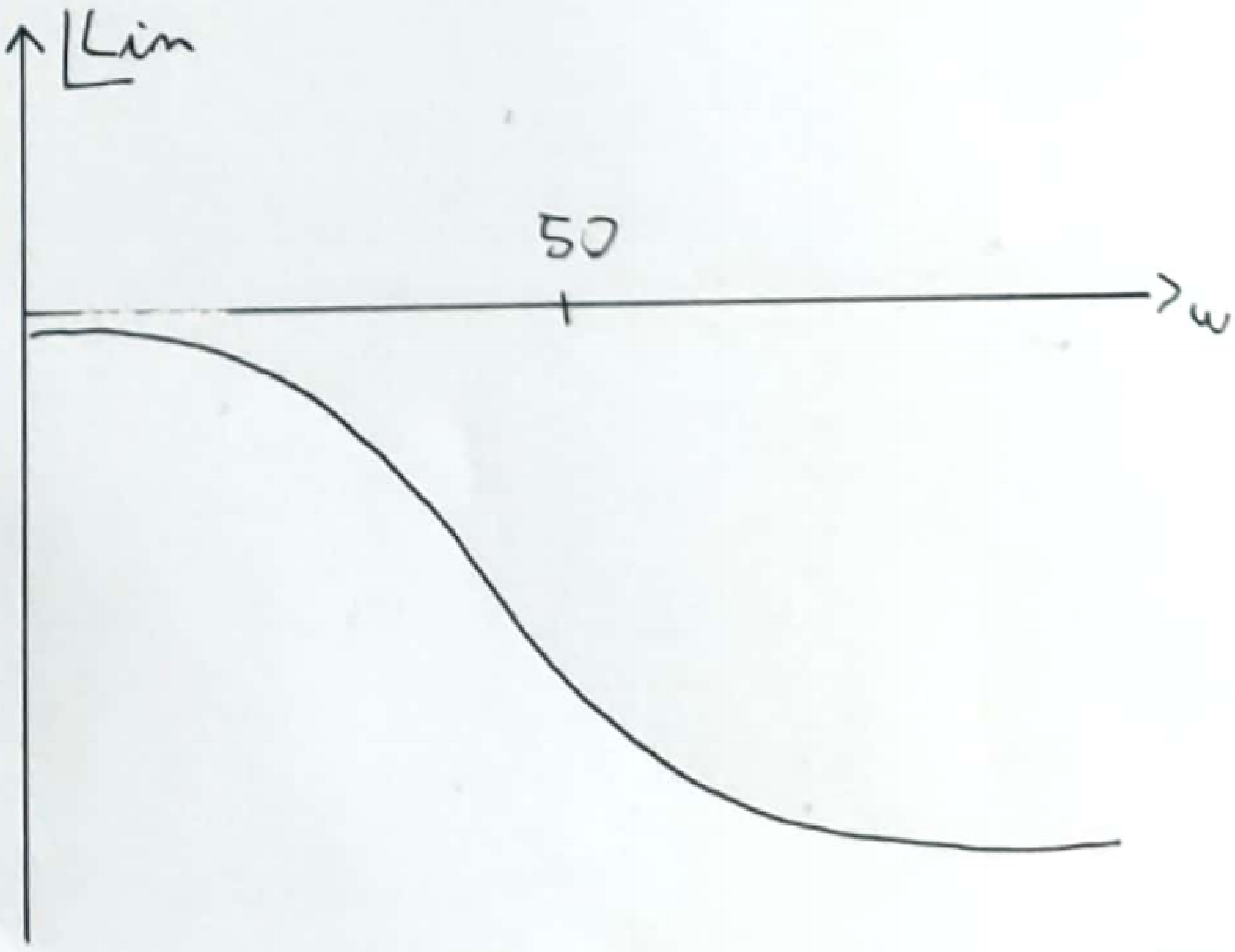
$L_{in} = G_c(s) G_p(s) G_f G_s G_a$

$$G_p = \frac{10}{s(s+50)^2}$$
· 1 polo in zero origine
· 2 poli in $\omega = 50$

Bode

SCELGO $K_{c,in} = +1$



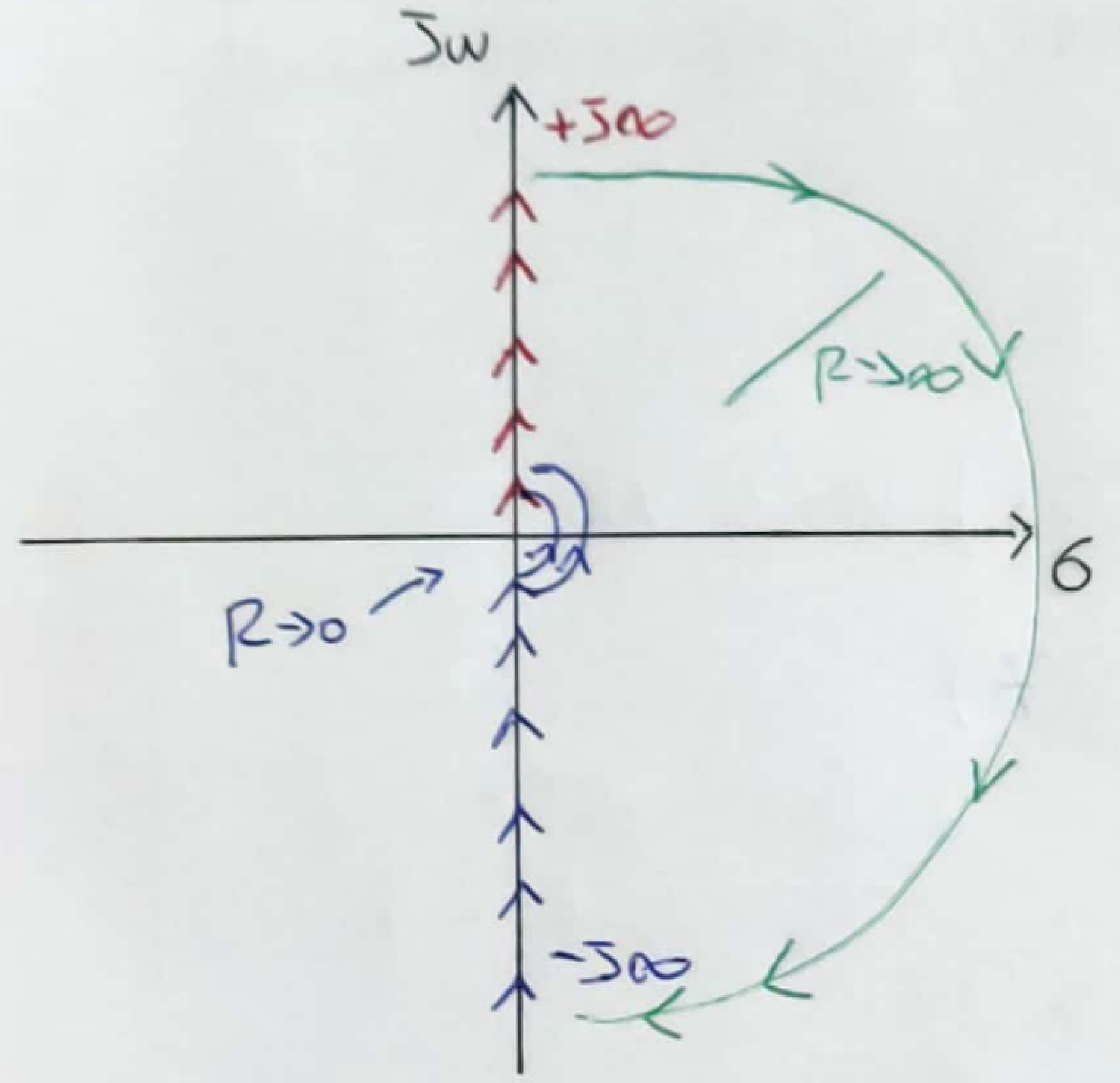


Nyquist $L_{in} = \dfrac{-30}{s^2 (s+50)^2}$ → 2 Poli nell'origine

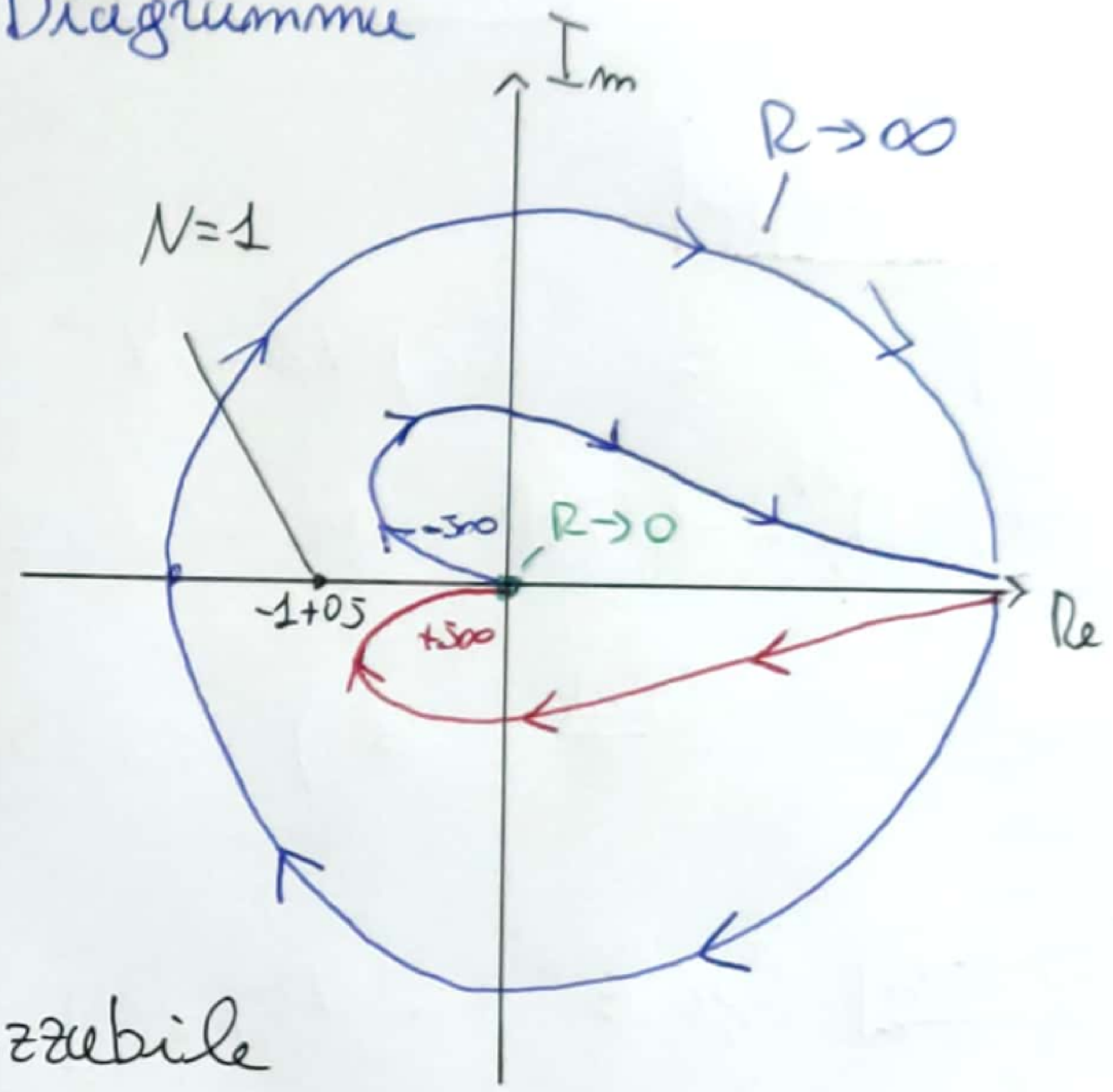
= 2 SEMICERCHI ANTIORARI di $R \to 0$ nel CONTORNO

= 2 SEMICERCHI ORARI di $R \to \infty$ nel DIAGRAMMA

Contorno



Diagramma



$P_{cl} = N + P_{ol}$ Sistema stabilizzabile solo per P_{cl} PARI

P_{ol} = n° di poli instabili in L_{in} (Poli dell'impianto) → $P_{ol} = 0$

$P_{cl} = N = 1$ DISPARI per $K_c > 0$ → SCELGO $\boxed{K_c < 0}$

Scansionato con CamScanner

MARCO MAMERI

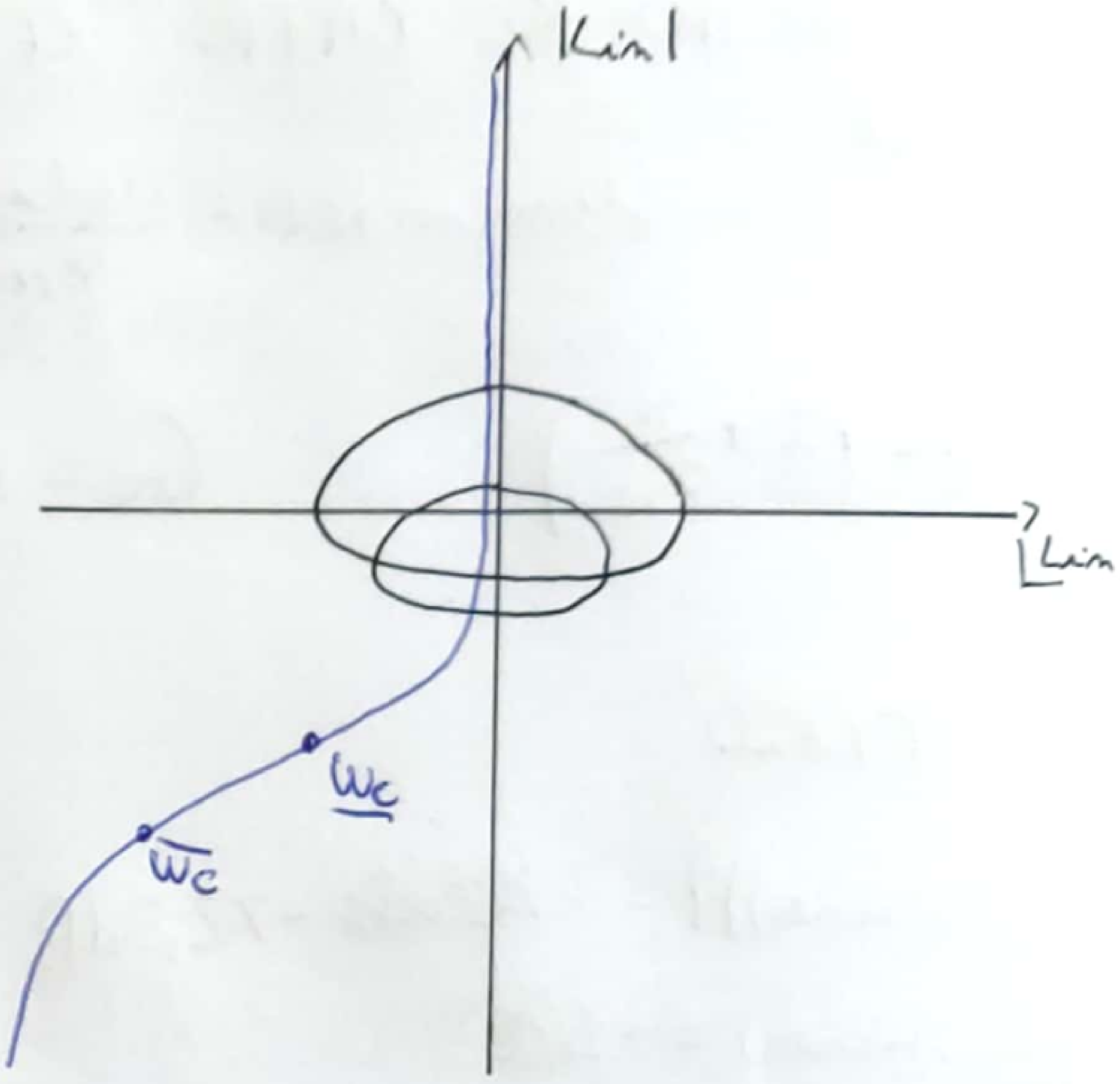
Progetto Controllore

~~Klix~~ $G_{cin} = \frac{K_c}{s}$ con K_c LIBERO e $K_c < 0$

$K_{cin} = -1$ $L_{in} = \frac{30}{s^2(s+50)^2}$

$\omega_c \in [19{,}72 ; 100] \frac{rad}{s}$

$\underline{\omega_c}$ $\overline{\omega_c}$



in $\underline{\omega_c}$ $|L_{in}(j\underline{\omega_c})| = -91{,}4\,dB$

$\angle L_{in}(j\underline{\omega_c}) = -223°$

in $\overline{\omega_c}$ $|L_{in}(j\overline{\omega_c})| = -132\,dB$

$\angle L_{in}(j\overline{\omega_c}) = -306°$

DATO che K_c È LIBERO in MODULO PREDILIGO LA FASE.

PER ESSER FUORI DALL'AREA PROIBITA HO BISOGNO di $fase_{min} = -120°$

SCELGO $\angle L(j\omega_c)_{des} = -107°$ per evitare con maggior

MARGINE ~~B~~ ~~[illegible]~~ L'ELLISSE PIÙ GRANDE

SCELGO $\omega_{c\,des}$ VICINA A $\underline{\omega_c}$ PER DOVER RECUPERARE

MENO FASE

$$\boxed{\omega_{c\,des} = 50 \frac{rad}{s}}$$

$|L(j\omega_{c\,des})| = -112\,dB$

$\angle L(j\omega_{c\,des}) = -270°$

$\Delta_{FASE} = |270° - 107°| \simeq 163°$

$\Delta_{MODULO} = 112\,dB$

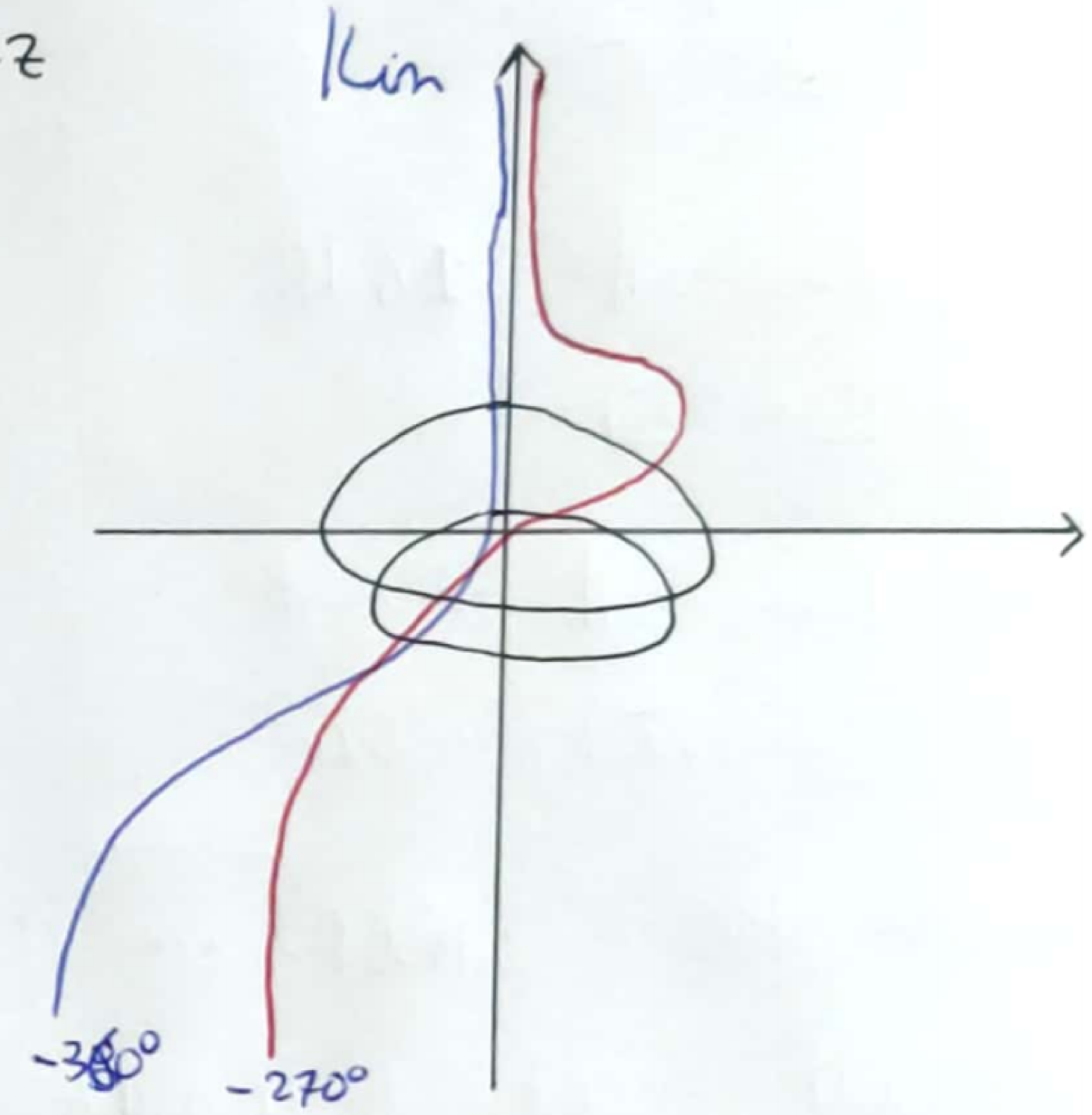
DATO che $V=1$ HO A DISPOSIZIONE una RETE REAL ZERO

RETE REAL ZERO

DATO che HO K_c LIBERO CERCO di RECUPERARE LA MASSIMA FASE

$$\omega_{norm\,zero} = \frac{\omega_{c\,des}}{z_{zero}} = 100 \quad , \quad z_{zero} = \frac{\omega_{c\,des}}{\omega_{norm\,zero}} = \frac{1}{2}$$

$$R_z = \left(1 + \frac{s}{z_{zero}}\right) \qquad G_c = \frac{K_c}{s} \cdot R_z$$



OTTENGO

$$|L(j\omega_{c\,des})| = -72{,}3\,dB$$
$$\angle L(j\omega_{c\,des}) = -180°$$

INSERISCO una RETE LEAD PER RECUPERARE ULTERIORI $(180° - 107°) = 73°$

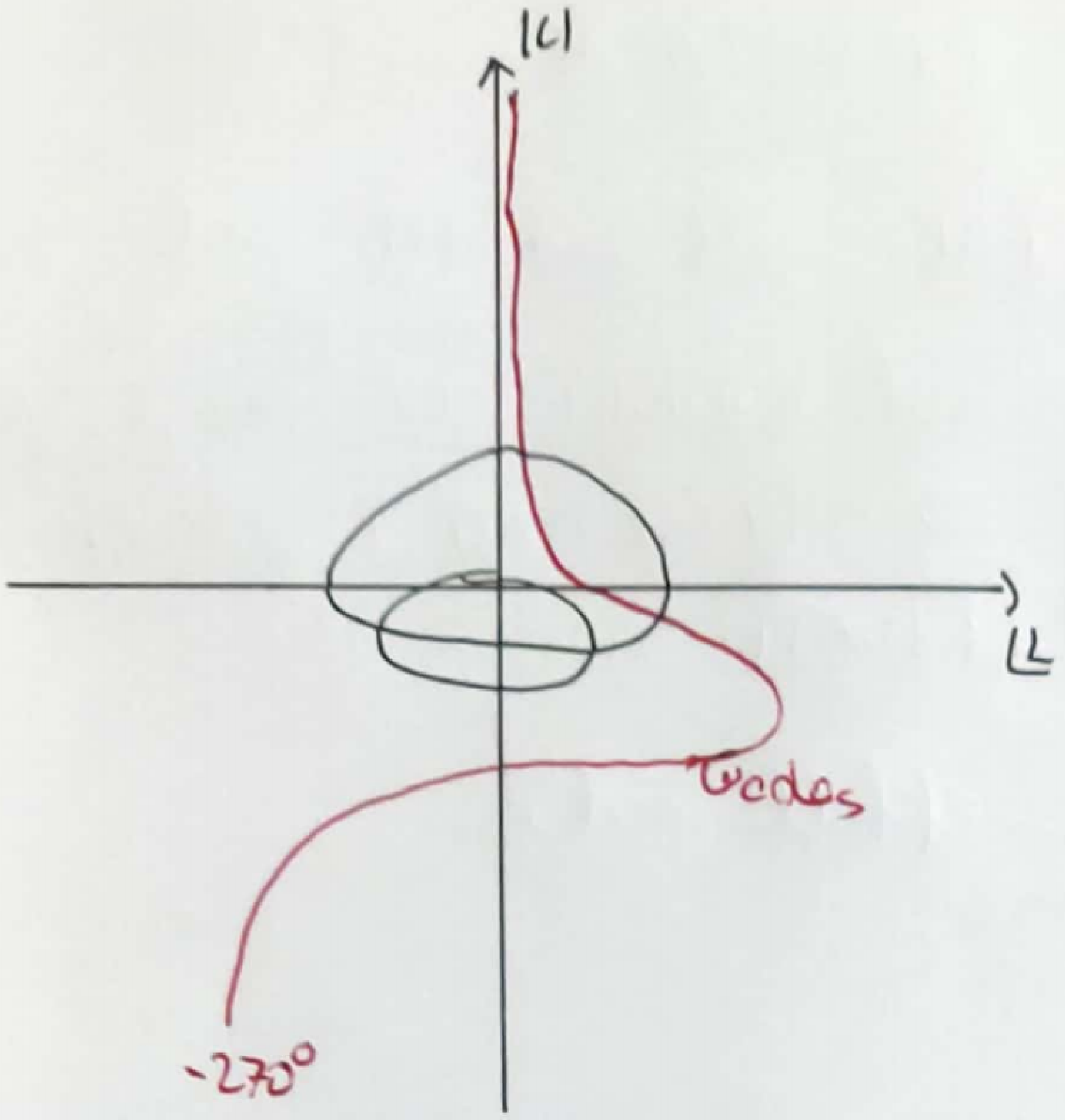
RETE LEAD

PER RECUPERARE LA MAGGIOR FASE POSSIBILE PONGO $m_d = 16$

$$\omega_{norm\,lead} = 4 \qquad R_{lead} = \frac{1 + \frac{s}{z_{lead}}}{1 + \frac{s}{m_d \cdot z_{lead}}}$$

$$\omega_{norm} = \frac{\omega_{c\,des}}{z_{lead}} \rightarrow z_{lead} = 12{,}5$$

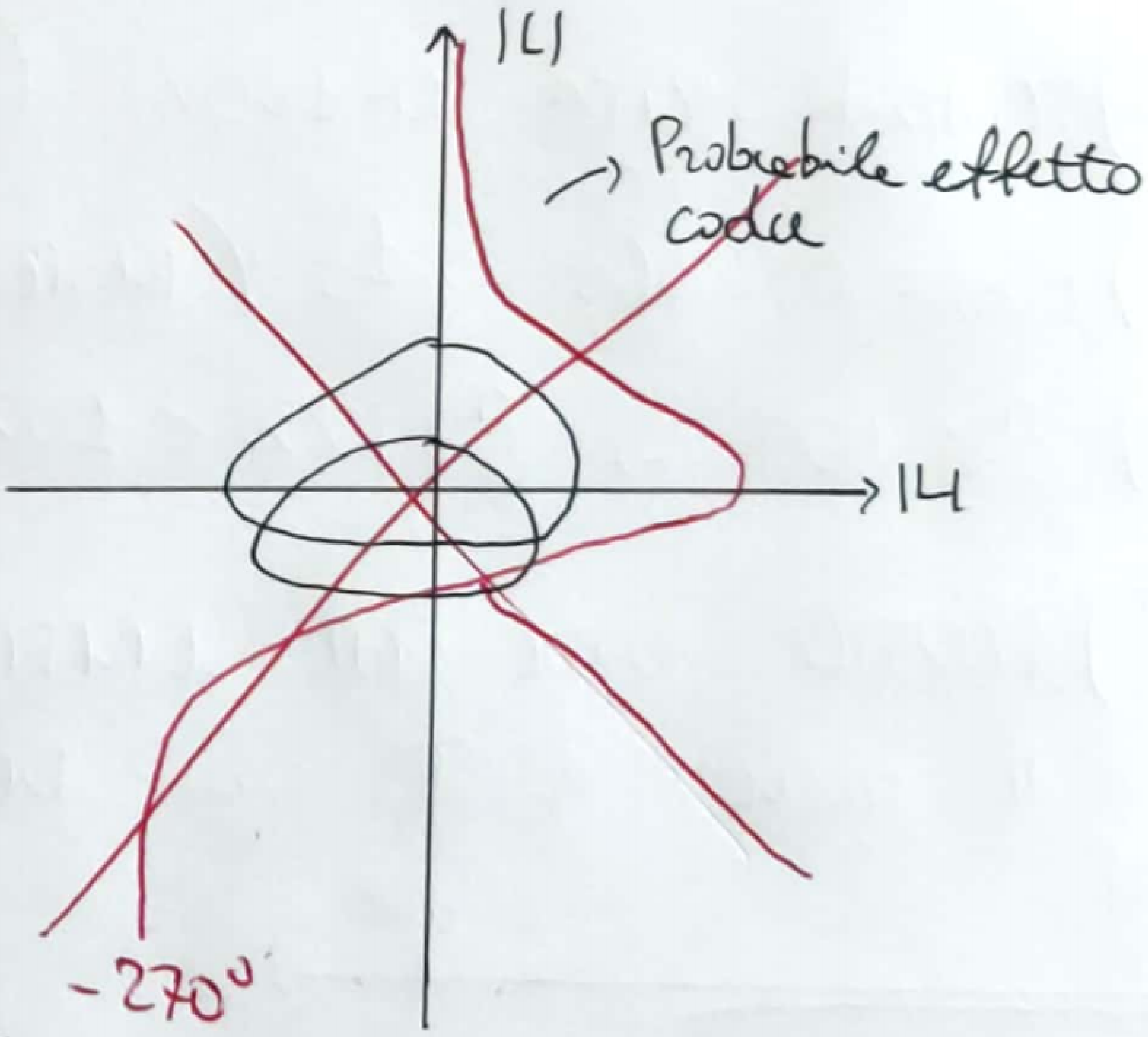
OTTENGO $|L(j\omega_{c\,des})| = -60.3\,dB \quad \angle L(j\omega_{c\,des}) = -119°$



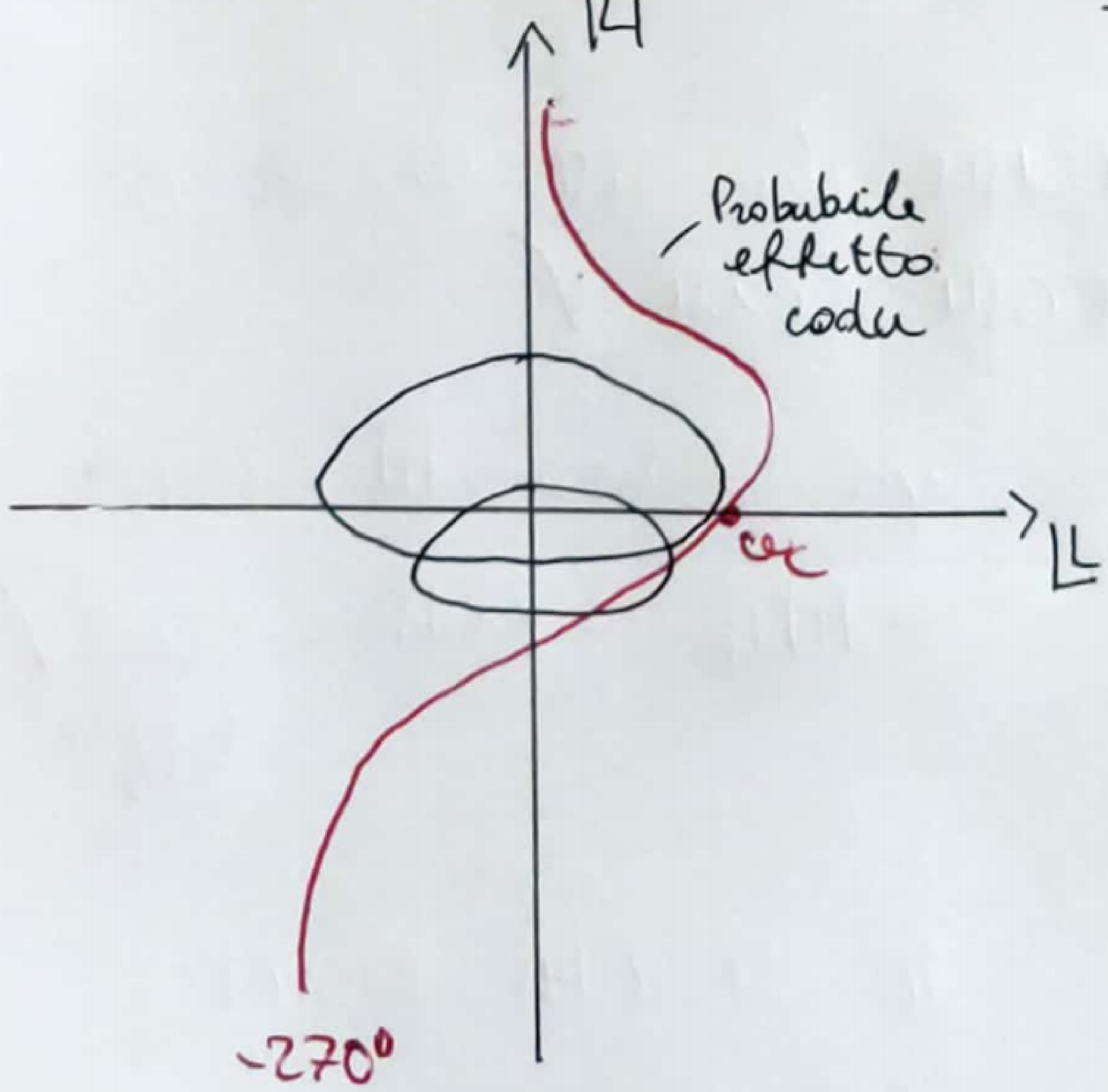
POTREI RECUPERARE ULTERIORE FASE, MA TECNICAMENTE $\omega_{c,des}$ È, in FASE, FUORI DALLA ZONA PROIBITA (di POCO), QUINDI VERIFICO PRIMA I REQUISITI

Kc) DATO che $|L(j\omega_{c,des})| = -60{,}3\,dB$, CERCO di RECUPERARE TALE MODULO PONENDO $K_c = -10^{\frac{60,3}{20}}$

$$\boxed{K_c \simeq -1{,}047 \cdot 10^{+3}}$$

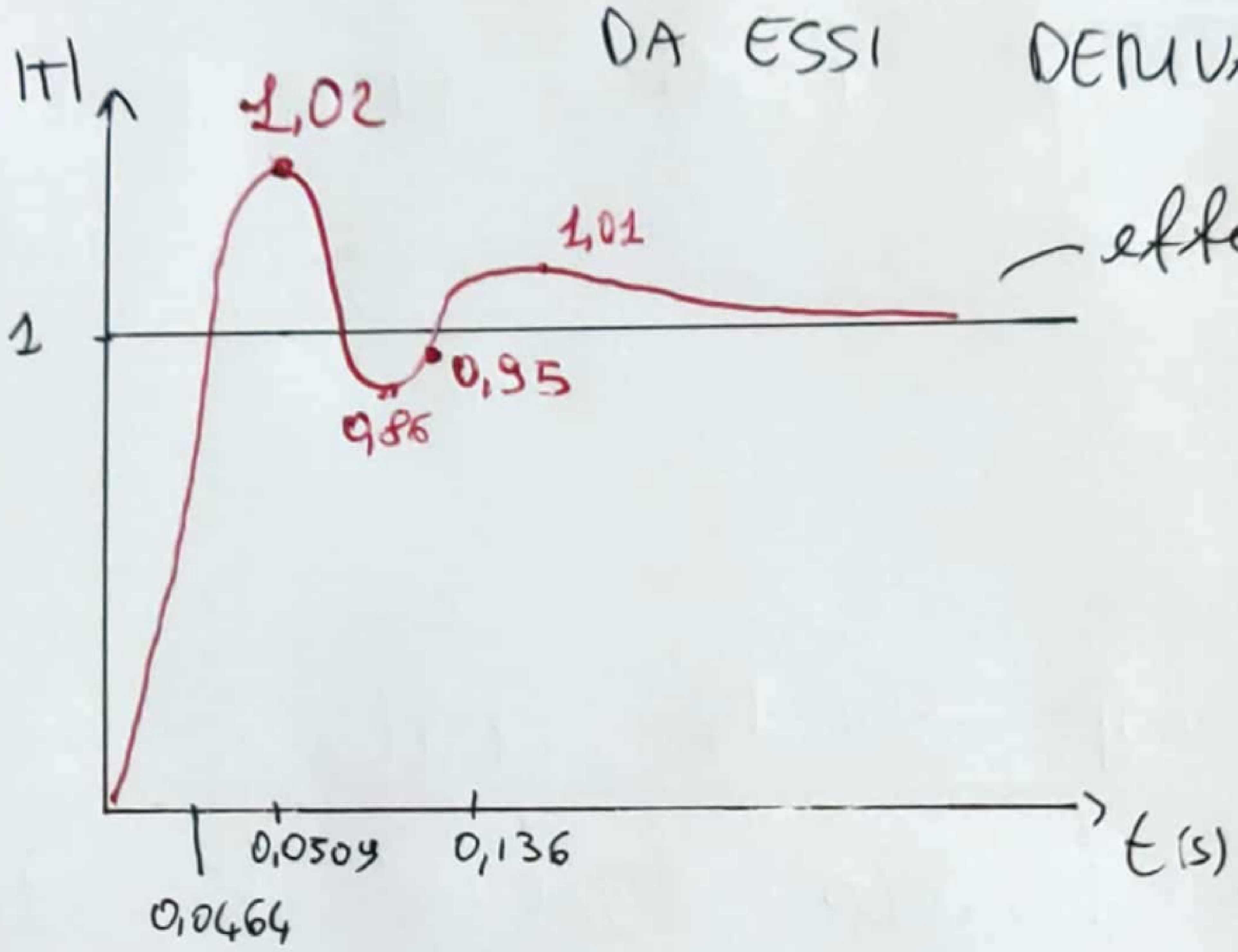


TAGLIA di POCO LA ZONA PROIBITA



Verifica Requisiti

Plotto la RISPOSTA AL GRADINO di $T = \frac{L}{1+L}$ PER VERIFICARE I REQUISITI sul TRANSITORIO → I REQUISITI sugli ERRORI $\xrightarrow{}$ non periodici SONO RISPETTATI IN QUANTO SONO RISPETTATI I VINCOLI DA ESSI DERIVATI

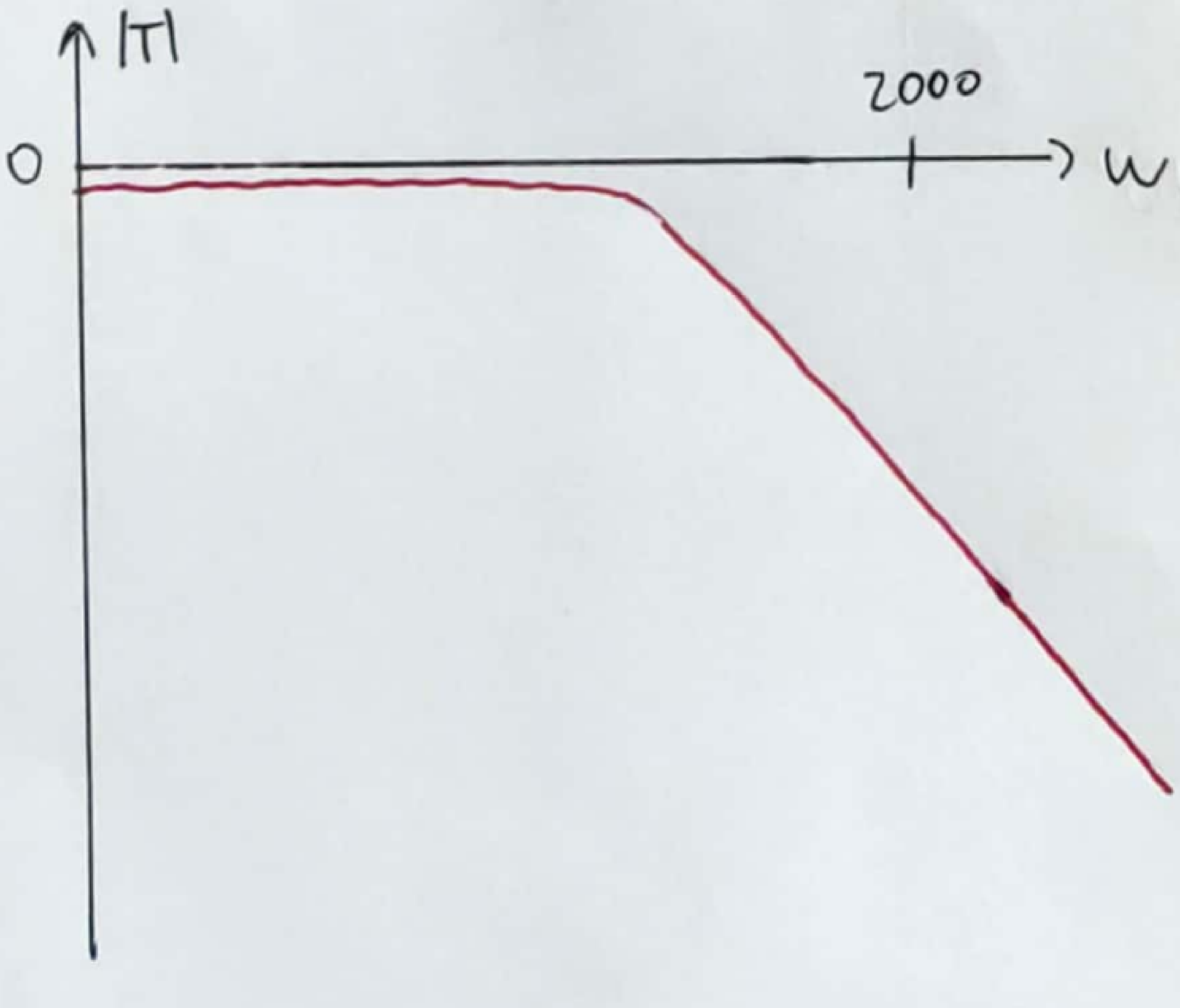


S5) TEMPO di SALITA 0-100% $t_r = 0{,}0464\,s < 0{,}1$ ✓ RISPETTATO

S6) $t_{s,5\%} = 0{,}136\,s < 1\,s$ ✓ RISPETTATO

S7) $\hat{S} < 10\% \rightarrow \hat{S} = +2\% < 10\%$ ✓ RISPETTATO

M_T^{HF}) PLOTTO BODE PER VERIFICARE che PER $\omega > \omega_s = 2000$ rad IL MODULO di T sia DECRESCENTE ✓



in $\omega = 2000 \rightarrow |T| = 1{,}25 \cdot 10^{-4}$

$\rightarrow |T|_{dB} = -78\,dB < -40\,dB$ ✓

↳ M_T^{HF}

IL SISTEMA RISPETTA OGNI REQUISITO

Gc DEFINITIVO

$$G_c(s) = \frac{-33508\,(s+12,5)(s+0,5)}{s\,(s+200)}$$

$$L(s) = \frac{1,0052\cdot 10^6\,(s+12,5)(s+0,5)}{s^2\,(s+200)\,(s+50)^2}$$

Tempo di Campionamento

$\omega_{camp} = \frac{2\pi}{T_{camp}}$

- $\omega_{camp} \gg 2\cdot \omega_{ds} \rightarrow \omega_{camp} \gg (2000\cdot 2)\,\frac{rad}{s}$

  $\omega_{camp} \gg 4000\,\frac{rad}{s}$

  $\rightarrow T_{camp} \ll \frac{2\pi}{4000} \Rightarrow T_{camp} \ll 0,0016\,s$

- $30\,\omega_c \leq \omega_{camp} \leq 60\,\omega_c$

MA $30\cdot\omega_c = 1500 < 4000$, REQUISITO GIA' SODDISFATTO

ESTREMO SUPERIORE $60\cdot\omega_c = 3000\,\frac{rad}{s}$ $\rightarrow$ ~~$T_{camp} = \frac{2\pi}{3000}$~~

$\hookrightarrow 3000 < 4000$

$$\boxed{T_{camp} \ll 0,0016\,s}$$

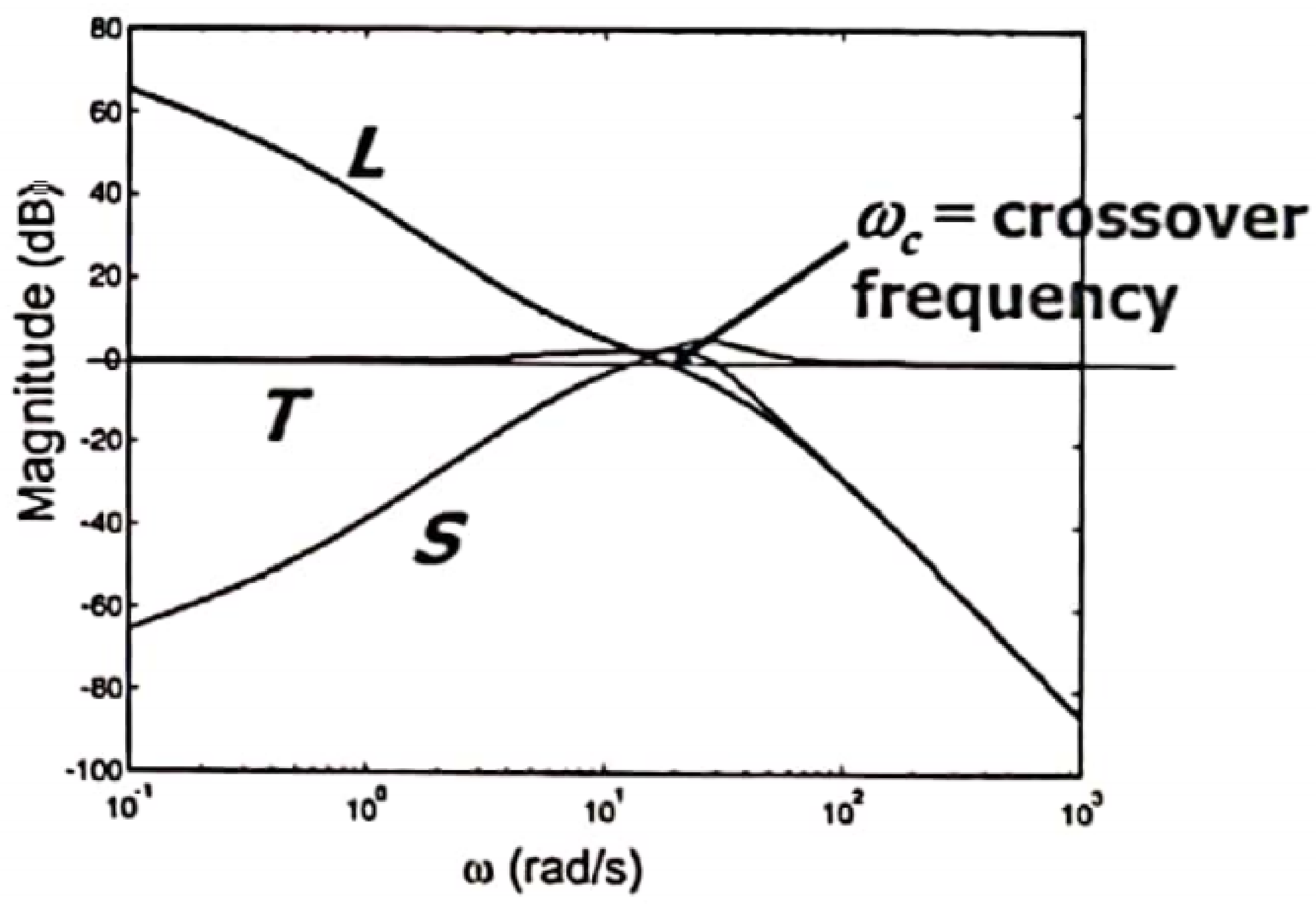
$f(k)$	$F(z)$
$\delta(k)$	1
$\varepsilon(k)$	$\frac{z}{z-1}$
$\binom{k}{\ell} \triangleq \frac{k(k-1)\cdots(k-\ell+1)}{\ell!}, \ell > 0$	$\frac{z}{(z-1)^{\ell+1}}$
a^k	$\frac{z}{z-a}$
$\binom{k}{\ell} a^{k-\ell}, \ell > 0$	$\frac{z}{(z-a)^{\ell+1}}$
$\sin(\vartheta k), \vartheta \in \mathbb{R}$	$\frac{z\sin(\vartheta)}{z^2 - 2\cos(\vartheta)z + 1}$
$\cos(\vartheta k), \vartheta \in \mathbb{R}$	$\frac{z(z-\cos(\vartheta))}{z^2 - 2\cos(\vartheta)z + 1}$
$A^k, A \in \mathbb{R}^{n,n}$	$z(zI - A)^{-1}$

$f(t)$	$F(s)$
$\delta(t)$	1
$\varepsilon(t)$	$\frac{1}{s}$
$\frac{t^n}{n!}$	$\frac{1}{s^{n+1}}$
e^{At}	$(sI - A)^{-1}$

$f(t)$	$F(s)$
e^{at}	$\frac{1}{s-a}$
$\frac{t^n e^{at}}{n!}$	$\frac{1}{(s-a)^{n+1}}$
$\sin(\omega_o t)$	$\frac{\omega_o}{s^2 + \omega_0^2}$
$\cos(\omega_o t)$	$\frac{s}{s^2 + \omega_0^2}$

$$G_c(s) = \frac{K_c}{s^\nu} \prod_i \underbrace{\left(\frac{1 + \frac{s}{z_{di}}}{1 + \frac{s}{m_{di} z_{di}}} \right)}_{\text{LEAD}} \prod_j \underbrace{\left(\frac{1 + \frac{s}{m_{ij} p_{ij}}}{1 + \frac{s}{p_{ij}}} \right)}_{\text{LAG}}$$

Input order / System type	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	$\frac{K_d^2 R_0}{K_p K_c G_a}$



$$\omega_L = \omega_p^+ * 10^{\frac{-M_s,LF}{40}}$$

$$T_p = \frac{1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}}$$

$$\hat{s} = e^{\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \Rightarrow \zeta = \frac{|\ln(\hat{s})|}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(\hat{s})}}$$

$$S_p = \frac{2\zeta\sqrt{2+4\zeta^2+2\sqrt{1+8\zeta^2}}}{\sqrt{1+8\zeta^2}+4\zeta^2-1}$$

$$t_{s,\alpha\%} \cdot \omega_c = \frac{-\ln\alpha}{\zeta} \cdot \sqrt{\sqrt{1+4\zeta^4} - 2\zeta^2}$$

$$t_r \cdot \omega_c = \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}}(\pi - \arccos(\zeta)) \cdot \sqrt{\sqrt{1+4\zeta^4} - 2\zeta^2}$$

- $30\, W_c \leq W_{samp} \leq 60 W_c \Rightarrow 0{,}1 \leq W_c \cdot T_{samp} \leq 0{,}2$
- $W_{samp} \gg 2 \cdot W_{ds}$

$P_{cl} = N + P_{ol} \rightarrow$ Poli $Re(p) > 0$

Criteri di stabilità sistemi LTI

Per sistemi TC:

- **Se n=2, *Regola dei segni*:** condizione necessaria e sufficiente per Re(λ)<0 è che gli a_n coefficienti siano di segno concorde (condizione non sufficiente per n>2)
- **Se n>2, *Tabella di Routh***

$p(\lambda) = a_n\lambda^n + a_{n-1}\lambda^{n-1} + \dots + a_1\lambda + a_0$					
n	a_n	a_{n-2}	a_{n-4}	...	0
n-1	a_{n-1}	a_{n-3}	a_{n-5}	...	0
n-2	b_{n-2}	b_{n-4}	b_{n-6}	...	0
n-3	c_{n-3}	c_{n-5}	c_{n-7}	....	...
...	...	...	....	...	...
0	a_0	0	0	...	...

con $b_{n-2} = -\frac{1}{a_{n-1}}\begin{vmatrix} a_n & a_{n-2} \\ a_{n-1} & a_{n-3} \end{vmatrix}$,

$b_{n-2} = -\frac{1}{a_{n-1}}\begin{vmatrix} a_n & a_{n-4} \\ a_{n-1} & a_{n-5} \end{vmatrix}$,

$c_{n-3} = -\frac{1}{b_{n-2}}\begin{vmatrix} b_{n-1} & b_{n-3} \\ b_{n-2} & b_{n-4} \end{vmatrix}$...

Condizione necessaria e sufficiente per Re(λ)<0, asintotica stabilità:

- **Se gli elementi della 1^ colonna hanno segno concorde.**
- **Se gli elementi della 1^ colonna non hanno segno concorde, ci sono tante radici di p(λ) con Re(λ)>0 quante sono le variazioni di segno.**

Per sistemi TD: *Tabella di Juri*

$p(\lambda) = a_n\lambda^n + a_{n-1}\lambda^{n-1} + \dots + a_1\lambda + a_0$							
n	a_0	a_1	a_2	...	a_{n-2}	a_{n-1}	a_n
n	a_n	a_{n-1}	a_{n-2}	...	a_2	a_1	a_0
n-1	b_0	b_1	b_2	...	b_{n-2}	b_{n-1}	
n-1	b_{n-1}	b_{n-2}	b_{n-3}	....	b_1	b_0	
n-2	c_0	c_1	c_2	...	c_{n-2}		
n-2	c_{n-2}	c_{n-3}	c_{n-4}	...	c_0		
...	...	...	...				
2	z_0	z_1	z_2				
2	z_2	z_1	z_0				

con $b_0 = \begin{vmatrix} a_0 & a_n \\ a_n & a_0 \end{vmatrix}$, $b_1 = \begin{vmatrix} a_0 & a_{n-1} \\ a_n & a_1 \end{vmatrix}$,

$c_0 = \begin{vmatrix} b_0 & b_{n-1} \\ b_{n-1} & b_0 \end{vmatrix}$, $c_1 = \begin{vmatrix} b_0 & b_{n-2} \\ b_{n-1} & b_1 \end{vmatrix}$...

Condizione necessaria e sufficiente per |λ|<1, asintotica stabilità:

- **se n = 2:**
  $p(\lambda=1)>0$ & $(-1)^n p(\lambda=-1)>0$
  & $|a_n| > |a_0|$
- **se n > 2:**
  $p(\lambda=1)>0$ & $(-1)^n p(\lambda=-1)>0$
  & $|a_n| > |a_0|$ & $|b_0| > |b_{n-1}|$
  & $|c_0| > |c_{n-2}|$ & ... & $|z_0| > |z_2|$

Criteri di stabilità sistemi NL TC

- **Asintotica stabilità:** $\forall i \mid Re(\lambda_i(A)) < 0$
- **Instabilità:** $\exists i \mid Re(\lambda_i(A)) > 0$
- **Non si può concludere:**
  $\forall i \mid Re(\lambda_i(A)) \le 0$
  $\exists k \mid Re(\lambda_k(A)) = 0$

Criteri di stabilità sistemi NL TD

- **Asintotica stabilità:** $\forall i \mid |\lambda_i(A)| < 1$
- **Instabilità:** $\exists i \mid |\lambda_i(A)| > 1$
- **Non si può concludere:**
  $\forall i \mid |\lambda_i(A)| \le 1$
  $\exists k \mid |\lambda_k(A)| = 1$

Stabilità esterna e risposta a regime

Sistema dinamico LTI in *forma minima* se e solo se è completamente raggiungibile e completamente osservabile.

- **Stabilità esterna LTI TC**
  BIBO stabile -> ∀polo w_p: $Re(w_p) < 0$
- **Stabilità esterna LTI TC**
  BIBO stabile -> ∀polo w_p: $|w_p| < 1$

NB: sistema LTI: Forma minima e esternamente stabile <-> asintoticamente stabile

Risposta a regime

- **Ingresso costante:** $u(t)=\bar{u}\varepsilon(t)$
  $y_{part}(t) = \bar{y}\varepsilon(t) = -CA^{-1}B\bar{u}\varepsilon(t)$
  con $\bar{y} = |H(0)|\bar{u}$
- **Ingresso sinusoidale:**
  $\bar{y} = \bar{u}|H(j\omega_0)|\sin(t\omega_0 + \arg(H(j\omega_0)))$