



Instituut voor
Engineering en Applied Science

Naam deelnemer:

Studentnummer:

--	--	--	--	--	--	--	--

Opleiding	:	Elektrotechniek
Cursusnaam	:	Regeltechniek
Cursuscode	:	ELEREG10
Tentamenperiode	:	PROEFTOETS T2
Toetsdatum	:	2021-2022
Begintijd	:	
Duur (in minuten)	:	120 min
Docent	:	BerEM
Collegiale review	:	
Cesuur	:	Zie cursushandleiding, Cijfer = $\max\left(1, \frac{\text{Punten}}{10}\right)$
Aantal pagina's	:	2 (exclusief voorblad)
Toetsen inleveren	:	Ja
Kladpapier inleveren	:	Nee

Toegestane hulpmiddelen:

- 1 A4 (2 kantjes), handgeschreven, met eigen aantekeningen.
- Normale rekenmachine, geodriehoek.
- Pen, kleurpotloden, markeerstiften.

**Overige
opmerkingen:**

- Indien een antwoord niet wordt verklaard, worden geen punten toegekend.
- Laat bij alle opgaven duidelijk zien hoe je aan je antwoorden komt en geef dus waar nodig je berekeningen.
- Voor taalfouten worden geen punten afgetrokken.

1. Gegeven is het systeem

$$H(s) = \frac{2}{(s+3)^2(s+1)}.$$

a. [10 punten] (Leerdoel 2)

Bereken de modulus en de fase van dit systeem bij $\omega = 2\text{rad/s}$.

b. [8 punten] (Leerdoel 3)

Schets het bodediagram (magnitude- en fasekarakteristiek) van dit systeem.

1. geef de kantelpunten aan op de horizontale as
2. geef belangrijke waarden aan op de verticale as (dB)
3. schets de asymptoten
4. geef de -3dB of +3dB punten etc. van het figuur aan.
5. geef de stijging en daling per decade aan in je figuur

c. [5 punten] (Leerdoel 1)

Wat is het verschil tussen een Polair figuur en een bodediagram?

2. Gegeven is het systeem

$$H(s) = \frac{5}{(2s+1)^4}.$$

Dit systeem wordt proportioneel geregeld

a. [8 punten] (Leerdoel 2)

Bepaal in het s-domein voor welke waarde van K het geregelde systeem instabiel wordt.

b. [10 punten] (Leerdoel 2)

Controleer je antwoord van (a) in het frequentiedomein.

c. [3 punten] (Leerdoel 2)

Voor welke K heeft het geregelde systeem een statische fout $e_{ss} = 20\%$?

d. [4 punten] (Leerdoel 1)

Hoe zou je dit systeem stabiel kunnen maken voor alle waarden van K?

3.

$$H(s) = \frac{20}{s(s+4)(s+2)}.$$

Het systeem wordt proportioneel geregeld

a. [9 punten] (Leerdoel 4)

Bij welke K is de fasemarge $PM = 60^\circ$?

b. [6 punten] (Leerdoel 4)

Bij welke K is de versterkingsmarge $GM = 0,5$?

c. [4 punten] (Leerdoel 1)

Wat gebeurt er met de versterkingsmarge als K vergroot wordt?

4.

$$H(s) = \frac{12}{s^2}.$$

a. [8 punten] (Leerdoel 4)

Ontwerp een lead compensator in het frequentiedomein zodanig dat de fasemarge van het geregelde systeem 15° groter wordt.

5. Gegeven is de volgende overdrachtsfunctie:

$$H(s) = \frac{2(s+7)}{(s+5)(s+3)}.$$

Het systeem moet aan de volgende voorwaarden voldoen:

1. Het systeem moet stabiel zijn.
2. De settlingtime $t_s(2\%)$ moet kleiner zijn dan 0,8 seconden.
3. Het systeem moet een zo klein mogelijke statische fout e_{ss} hebben.
4. De piektijd t_p moet kleiner zijn dan 0,5 seconden.

Laat zien met welke regeling (P,PI of PD) dit systeem aan deze voorwaarden kan voldoen (of niet):

a. [5 punten] (Leerdoel 3)

Schets de poolbaan van het P geregelde systeem

b. [6 punten] (Leerdoel 3)

Schets de poolbaan van het PI geregelde systeem. Kijk zelf waar je het nulpunt het beste kan neerleggen om aan de voorwaarden te voldoen.

c. [6 punten] (Leerdoel 3)

Schets de poolbaan van het PD geregelde systeem. Kijk zelf waar je het nulpunt het beste kan neerleggen om aan de voorwaarden te voldoen.

d. [8 punten] (Leerdoel 4)

Vergelijk de resultaten van vraag a,b en c: welke poolbaan voldoet het best aan de eisen en waarom? Geef waar mogelijk waarden en berekeningen!

Einde van dit tentamen.

Vraag:	1	2	3	4	5	Totaal
Punten:	23	25	19	8	25	100

1. $H = \frac{2}{(s+3)^2 (s+1)}$

a. $|H|$ en φ berekenen: (modulus en hoek) bij $\omega = 2 \text{ rad/s}$

① $H = \frac{2}{(j\omega + 3)^2 (j\omega + 1)} \quad s \rightarrow j\omega$

evt: uitvermenigvuldigen:

$$H = \frac{2}{(-\omega^2 + 6j\omega + 9)(j\omega + 1)} = \frac{2}{-j\omega^3 - \omega^2 - 6\omega^2 + 6j\omega + 9j\omega + 9}$$

$\uparrow j^2 = -1$

$$H = \frac{2}{-j\omega^3 - 7\omega^2 + 15j\omega + 9} = \frac{2}{\underbrace{-7\omega^2 + 9}_{\text{Re}} - \underbrace{j\omega^3 + 15j\omega}_{\text{Im}}}$$

② $|H|$ bepalen: $= \frac{\text{mod. teller}}{\text{mod. noemer}}$

$$|H| = \frac{2}{\sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2}} = \frac{2}{\sqrt{(-7\omega^2 + 9)^2 + (-\omega^3 + 15\omega)^2}}$$

③ φ bepalen: $= \text{hoek teller} - \text{hoek noemer}$

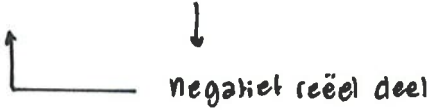
$$\varphi = 0 - \arctan \frac{\text{Im}}{\text{Re}} = - \arctan \frac{-\omega^3 + 15\omega}{-7\omega^2 + 9}$$

$\uparrow$ hoek reële getal 2

④ $\omega = 2 \text{ rad/s}$ invullen:

$$|H| = \frac{2}{\sqrt{(-7 \cdot 2^2 + 9)^2 + (-2^3 + 15 \cdot 2)^2}}$$
$$= \frac{2}{\sqrt{(-19)^2 + (22)^2}} = 0,07$$

$$\varphi = - \left(\arctan \left(\frac{-2^3 + 15 \cdot 2}{-7 \cdot 2^2 + 9} \right) + 180^\circ \right)$$



$$= - \left(\arctan \left(\frac{22}{-19} \right) + 180^\circ \right)$$

$$= -130,8^\circ$$

Zonder uitvermenigvuldigen:

sneller!

2. $|H|$ en φ

$$H = \frac{2}{(j\omega + 3)^2 (j\omega + 1)}$$

$$|H| = \frac{2}{(\sqrt{\omega^2 + 3^2})^2 \cdot \sqrt{\omega^2 + 1^2}} \rightarrow \text{vermenigvuldigen moduli noemer}$$

$$\varphi = 0 - \left(2 \arctan \frac{\omega}{3} + \arctan \frac{\omega}{1} \right)$$

↳ optellen hoeken noemer

invullen:

$$|H| = \frac{2}{(\sqrt{2^2 + 9})^2 \cdot \sqrt{2^2 + 1}} = 0,07$$

$$\varphi = 0 - \left(2 \arctan \frac{2}{3} + \arctan 2 \right)$$

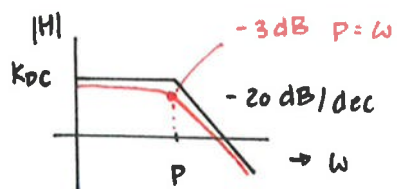
$$= -130,8^\circ$$

1b. Bodediagram schetsen

algemeen:

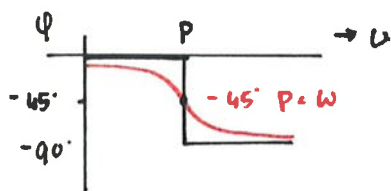
pool:

$$H = \frac{1}{s+p}$$



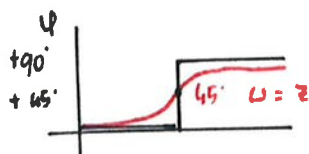
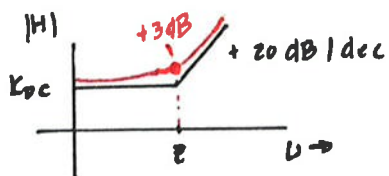
$$K_{DC} = \frac{1}{0+p} = \frac{1}{p} \quad \text{in dB: } 20 \cdot \log \frac{1}{p}$$

$\uparrow_{s=0}$



nulpunt:

$$H = s+z$$



$$1b \quad H = \frac{2}{(j\omega + 3)^2 (j\omega + 1)}$$

$$\omega = p_{1,2} = 3 \quad (2x)$$

$$\omega = p_3 = 1$$

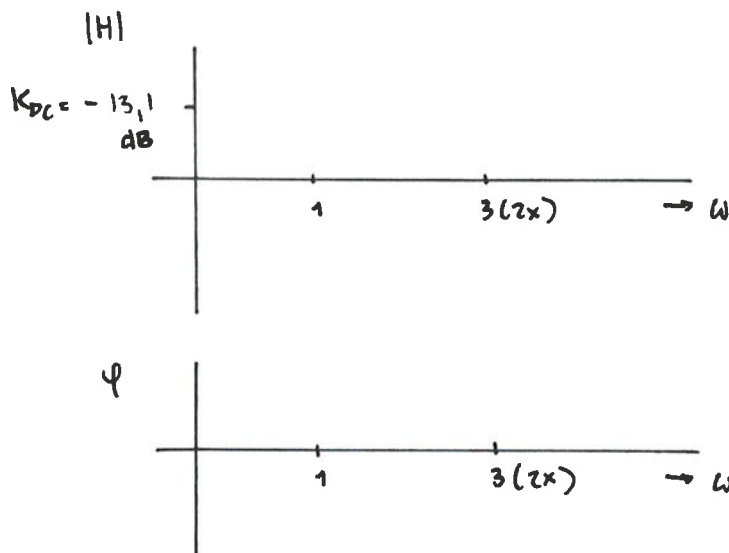
} 3 polen, geen nulpunten

$$K_{DC} = \frac{2}{(0+3)^2 (0+1)} = \frac{2}{9}$$

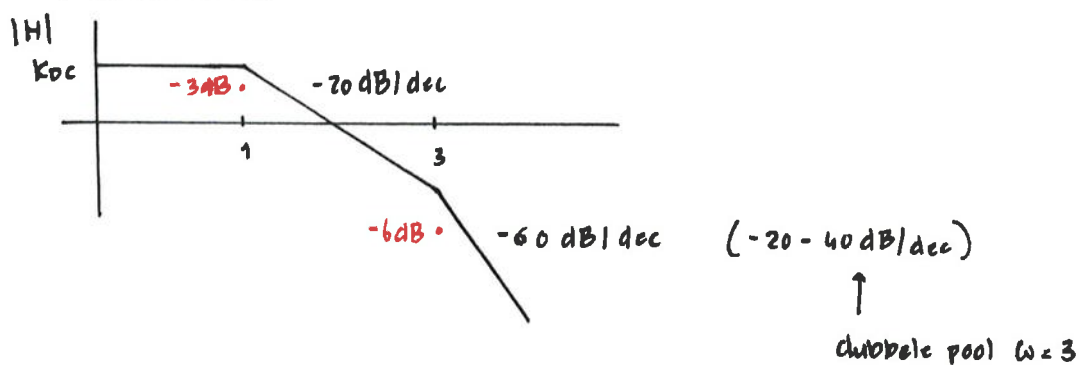
$$\text{in dB: } 20 \cdot \log \frac{2}{9}$$

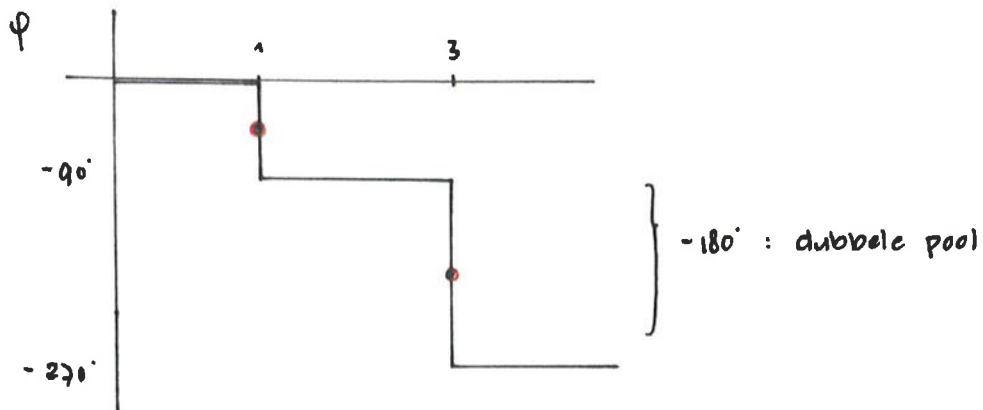
$$= -13,1 \text{ dB}$$

① opzet:

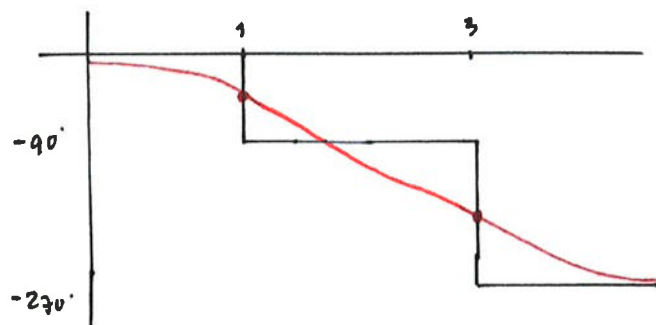
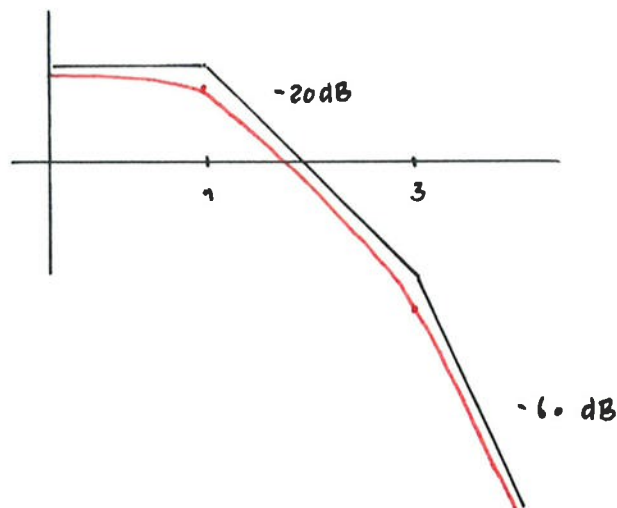


② asymptoten:





③ tekenen:



(let op. dit is alleen zichtbaar in Matlab bij grote getallen)
vb. 10, 30

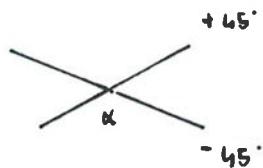
$$2. \quad H(s) = \frac{5}{(2s+1)^4}$$

Proportioneel geregeld (K)

2. voor welke K instabiel? bekijken in δ -domen

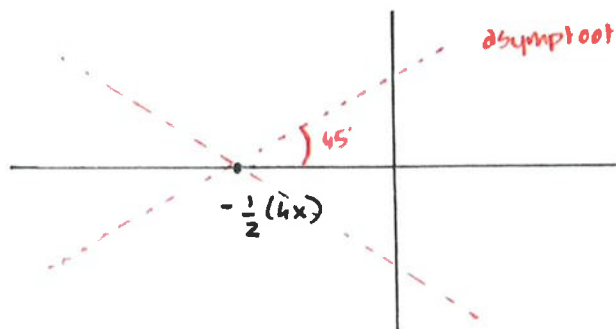
→ poolbaan schetsen!

- 4 polen bij $2s+1=0$
 $s = -1/2$ startpunten
- $n-m = 4-0 = 4$ asymptoten (4 polen, geen nulpunten)
 n m
- 4 asymptoten:

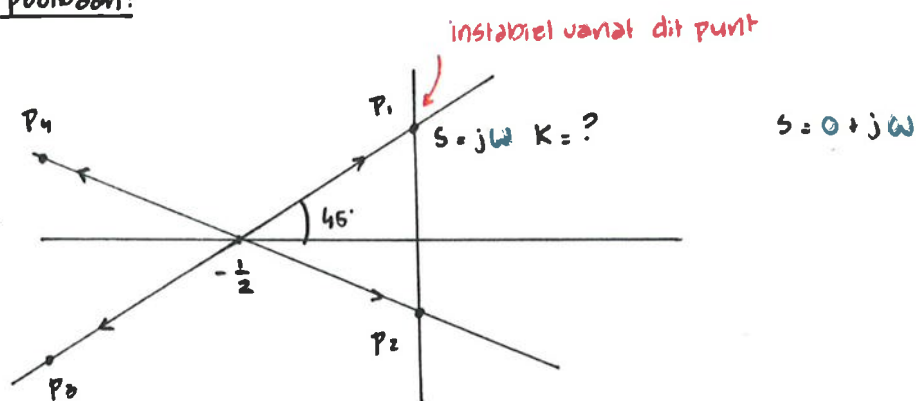


- ankerpunt asymptoten a :

$$d, \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_n}{n-m} = \frac{-\frac{1}{2} - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} - 0}{4-0} = -\frac{1}{2}!$$



poolbaan:



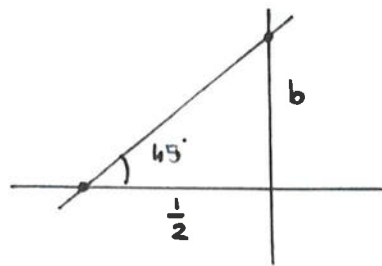
$$Hcl = \frac{K \cdot H}{1 + K \cdot H} = \frac{K \cdot \frac{5}{(2s+1)^4}}{1 + K \cdot \frac{5}{(2s+1)^4}} = \frac{5K}{(2s+1)^4 + 5K}$$

k.v: $(2s+1)^4 + 5K = 0$ Polen van het geregelde systeem

→ voor welke K liggen er 2 polen op de Im-as? $s = \pm jw$

Σ polen = constant

→ Werkt hier niet: p_3 en p_4 zijn ook complex!
(niet sneller)



(lengtes)

mbv driehoek: $\text{dichtan } \frac{\text{Im}}{\text{Re}} = 45^\circ$

dichtan $\frac{\omega}{0,5} = 45^\circ$

$\frac{\omega}{0,5} = \tan 45^\circ$

$\frac{\omega}{0,5} = 1 \quad \omega = 0.5$

dwb: $s = 0 + 0,5j$

bij die K wordt het systeem instabiel

invullen in k.v.:

$(2s + 1)^4 + 5K = 0$

invullen:

$$(2 \cdot 0,5j + 1)^4 + 5K = 0$$

$$((1+j)^2)^2 + 5K = 0$$

$$(1 + 2j - 1)^2 + 5K = 0$$

$$4j^2 + 5K = 0$$

$$-4 + 5K = 0$$

$$5K = 4$$

$$K = \frac{4}{5}$$

→ systeem Hcl wordt instabiel vanaf $K = \frac{4}{5}$

andere methode:

$s = 0 + j\omega$ invullen:

$$(2j\omega + 1)^4 + K = 0$$

uitvermenigvuldigen:

$$16\omega^4 - 32j\omega^3 - 24\omega^2 + 8j\omega + 1 + K = 0 + 0j$$

splitsten:

$$\text{Re: } 16\omega^4 - 24\omega^2 + 1 + K = 0 \quad (1)$$

$$\text{Im: } -32j\omega^3 + 8j\omega = 0j \quad (2)$$

$$(2) \quad -4\omega^3 + \omega = 0$$

$$\omega = 0 \quad \vee \quad -4\omega^2 + 1 = 0$$

$\omega = 0,5$ invullen in (1)

$$\rightarrow K = \frac{4}{5}$$

2b. $H(s) = \frac{5}{(2s+1)^4}$

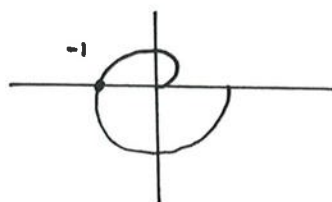
controle antwoord $K = \frac{4}{5}$ in $j\omega$ -domein

$$H(j\omega) = \frac{5}{(2j\omega + 1)^4}$$

① proportioneel geregeld:

$$H_{lus}(j\omega) = \frac{5K}{(2j\omega + 1)^4}$$

→ H_{cl} is instabiel als H_{lus} door punt -1 gaat:



$$|H|_{lus} = 1$$

$$\varphi_{lus} = -180^\circ$$

②

$$|H|_{lus} = \frac{5K}{(\sqrt{(2\omega)^2 + 1^2})^4} = 1 \quad (1)$$

$$\varphi_{lus} = 0 - 4 \cdot \arctan \frac{2\omega}{1} = -180^\circ \quad (2)$$

③ uitrekenen: ω waarbij $\varphi = -180^\circ$ (daarna invullen in $|H|$)

$$\varphi = -4 \arctan 2\omega = -180^\circ$$

$$\arctan 2\omega = 45^\circ$$

$$2\omega = 1 \quad \omega = 1/2$$

④ $\omega = 1/2$ invullen in $|H|$: K hieruit bepalen

$$|H| = \frac{5K}{(\sqrt{(2 \cdot 1/2)^2 + 1})^4} = 1$$

$$\frac{5K}{(\sqrt{2})^4} = 1$$

$$\frac{5K}{4} = 1$$

$$5K = 4$$

$$K = \frac{4}{5}$$

→ klopt met opgave 2a!

2c

$$e_{ss} = 20\% = 0,2$$

$$e_{ss} = \frac{1}{1 + KH(0)} \quad \text{met } H(0) = \frac{5}{(2s+1)^4} \quad \text{voor } s=0$$

invullen:

$$0,2 = \frac{1}{1 + K \cdot \frac{5}{(0+1)^4}}$$

$$0,2 = \frac{1}{1 + 5K}$$

$$\frac{1}{0,2} = 1 + 5K$$

$$K = \frac{4}{5} \\ = 0,8$$

grens instabiliteit!

$e_{ss} = 30\%$ proberen:

$$\frac{1}{0,3} = 1 + 5K$$

$$K = 0,47$$

is mogelijk, systeem
nog stabiel

conclusie: een $e_{ss} = 20\%$ is niet haalbaar!

controleer dit ook in Matlab!

3a $H(s) = \frac{20}{s(s+4)(s+2)}$ proportioneel geregeld

voor welke K is de fase marge PM = 60°?

① $H(j\omega) = \frac{5}{j\omega(j\omega+4)(j\omega+2)}$ $s \rightarrow j\omega$

② Proportioneel geregeld:

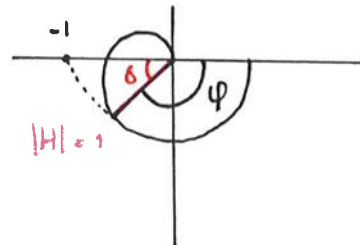
$$H(j\omega) = \frac{5K}{j\omega(j\omega+4)(j\omega+2)}$$

algemeen:

PM: fase marge: δ

$$\delta = 180^\circ - |\varphi|$$

$$|H| = 1$$

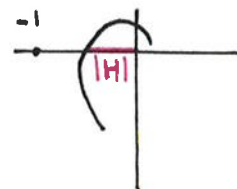


berekenen:

- kijken bij $|H| = 1$
- φ hierbij berekenen
- $\delta = 180^\circ - |\varphi| = \text{fase marge}$

GM: versterkingsmarge

$$GM = \frac{1}{|H|} \quad \text{bij } \varphi = -180^\circ$$



berekenen:

- kijken bij $\varphi = -180^\circ$
- $|H|$ berekenen bij deze hoek
- $GM = \frac{1}{|H|}$

vervolg 3a:

③ $|H|$ en φ bepalen

→ hier: uitvermenigvuldigen!

$$\begin{aligned} H(j\omega) &= \frac{5K}{j\omega(j\omega+4)(j\omega+2)} = \frac{5K}{j\omega(-\omega^2+2j\omega+4j\omega+8)} \\ &= \frac{5K}{-j\omega^3-2\omega^2-4\omega^2+8j\omega} = \frac{5K}{\underbrace{-j\omega^3+8j\omega}_{Im} - \underbrace{6\omega^2}_{Re}} \end{aligned}$$

$$|H| = \frac{5K}{\sqrt{(-6\omega^2)^2 + (-\omega^3+8\omega)^2}}$$

$$\varphi = 0 - \left(\text{orden} \frac{-\omega^3+8\omega}{-6\omega^2} + 180^\circ \right)$$

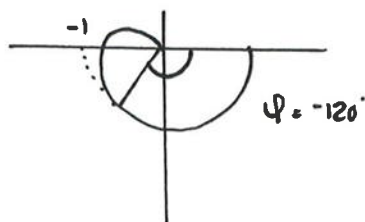
↑ ↓
negatief reëel deel

④ hier: PM is gegeven: $\delta = 60^\circ$

- φ berekenen (1)
- ω berekenen bij deze φ (2)
- invullen in $|H| = 1$ (3)
- hieruit volgt K (4)

(1) $|\varphi| = 180^\circ - \delta = 180^\circ - 60^\circ = 120^\circ$

$\varphi = -120^\circ$



(2) $\varphi = -\arctan \frac{-\omega^3 + 8\omega}{-6\omega^2} = -120^\circ$

+180° hoeft niet
→ geeft zelfde antwoord!

$$\frac{-\omega^3 + 8\omega}{-6\omega^2} = \tan 120^\circ$$

$$\frac{-\omega^3 + 8\omega}{-6\omega^2} = -1,7$$

$$-\omega^3 + 8\omega = 10,4\omega^2$$

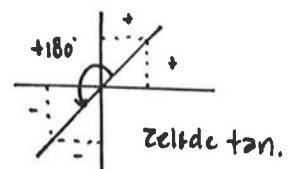
$$-\omega^3 + 8\omega - 10,4\omega^2 = 0$$

$$-\omega(\omega^2 + 10,4\omega - 8) = 0$$

$$\omega = 0$$

geen antwoord

$$\vee \omega^2 + 10,4\omega - 8 = 0$$



$$\omega^2 + 10,4\omega - 8 = 0$$

$$\omega = \frac{-10,4 \pm \sqrt{10,4^2 - 4 \cdot (-8)}}{2}$$

$$= \frac{-10,4 \pm 11,8}{2}$$

pos ω nemen

$$\omega = \frac{-10,4 + 11,8}{2} = 0,7$$

(3) ω invullen in $|H|=1$

$$|H| = \sqrt{\frac{5K}{(-6 \cdot 0,7^2)^2 + (-0,7^3 + 8 \cdot 0,7)^2}} = 1$$

$$= \sqrt{\frac{5K}{8,6 + 27,6}} = \frac{5K}{6} = 1$$

(4) K berekenen:

$$\frac{5K}{6} = 1$$

$$5K = 6$$

$$K = \frac{6}{5}$$

3b. Bij welke K is $GM = 0,5$?

$$\rightarrow GM = 0,5 \quad \text{dan} \quad |H| = \frac{1}{0,5} = 2 \quad \text{bij} \quad \varphi = -180^\circ$$

① $\varphi = -180^\circ$ bekijken, ω bepalen

$$\varphi = -\arctan \frac{-\omega^3 + 8\omega}{-6\omega^2} = -180^\circ$$

$$\frac{-\omega^3 + 8\omega}{-6\omega^2} = 0$$

$$-\omega^3 + 8\omega = 0$$

$$-\omega(\omega^2 - 8) = 0$$

$$\omega = 0 \quad \vee \quad \omega^2 - 8 = 0$$

v.n.

$$\omega = \pm \sqrt{8}$$

pos. waarde nemen:

$$\omega = 2\sqrt{2} = 2,8$$

② $\omega = 2,8$ invullen in $|H| = 2$, K bepalen

$$|H| = \frac{5K}{\sqrt{(-6 \cdot 2,8^2)^2 + (-2,8^3 + 8 \cdot 2,8)^2}} = 2$$

$$= \frac{5K}{\sqrt{2213 + 0,2}} = \frac{5K}{47} = 2$$

$$5K = 94$$

$$K = 18,8$$

4.

$$H = \frac{12}{s^2}$$

Leadcompensator ontwerpen zodat PM 15° groter wordt

① leadcompensator moet 15° toevoegen

$$\frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} = \sin 15^\circ$$

$$\frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} = 0,26$$

$$\alpha - 1 = 0,26(\alpha + 1)$$

$$\alpha - 1 = 0,26\alpha + 0,26$$

$$\alpha - 0,26\alpha = 0,26 + 1$$

$$0,74\alpha = 1,26 \quad \alpha = 1,7$$

② versterking lead compensator:

$$10 \log \alpha = 10 \log 1,7 = 2,3 \text{ dB}$$

→ frequentie zoeken waarbij systeem $|H| = -2,3 \text{ dB}$

$$|H| = -2,3 \text{ dB}$$

er geldt: $x_{dB} = 20 \cdot \log x$

andersom: $20 \cdot \log x = x_{dB}$

$$\log x = \frac{x_{dB}}{20}$$

$$x = 10^{\frac{x_{dB}}{20}}$$

$$|H| = -2,3 \text{ dB} = 0,77$$

③ $|H|$ bepalen:

$$H(s) = \frac{12}{s^2}$$

$$H(j\omega) = \frac{12}{-\omega^2}$$

(reëel getal!)
negatief

$$|H| = \frac{12}{\omega^2} \quad (\varphi = -180^\circ)$$

④ $|H| = 0,77$ ω bepalen

$$\frac{12}{\omega^2} = 0,77$$

$$\omega^2 = \frac{12}{0,77}$$

$$\omega = \pm 3,9$$

pos. waarde nemen: $\omega = 3,9$

- ⑤ $\omega = 3,9 \rightarrow$ bij deze frequentie hebben de versterking van de lead compensator en het systeem zelf elkaar op: $|H|_{\omega} = 1 = 0 \text{ dB}$

pool en nulpunt lead compensator:

$$p = \omega \cdot \sqrt{\alpha} = 3,9 \cdot \sqrt{1,7}$$

$$z = \frac{p}{\alpha} = \frac{3,9 \sqrt{1,7}}{1,7}$$

$$\rightarrow p = 5,1 \quad z = 3,0$$

- ⑥ overdracht regelator:

$$G_c = \frac{K}{\alpha} \cdot \frac{1 + \alpha \tau s}{1 + \tau s} \quad \text{met } \alpha \tau = \frac{1}{z}$$

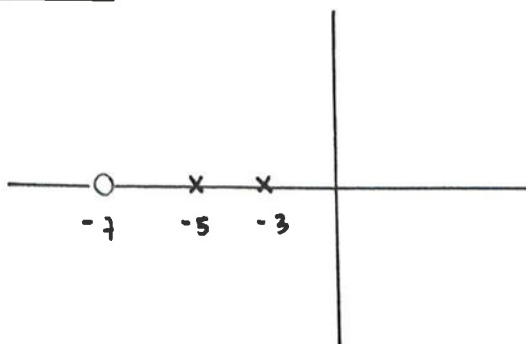
$$\tau = \frac{1}{p}$$

$$= \frac{K}{\alpha} \cdot \frac{1 + \frac{1}{z} s}{1 + \frac{1}{p} s} \quad K = \alpha \text{ nemen}$$

$$G_c = \frac{1 + \frac{1}{3} s}{1 + \frac{1}{5,1} s} = \frac{1 + 0,33 s}{1 + 0,2 s}$$

5. $H(s) = \frac{2(s+7)}{(s+5)(s+3)}$

systeem:

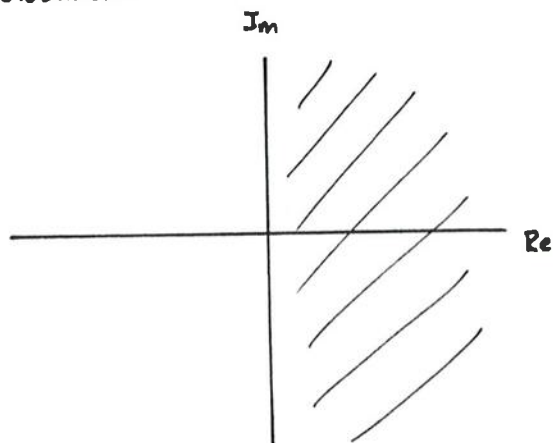


- Stabiel
- geen doorschot
- $t_s(z\%) = \frac{4}{3}$
- eis: $t_s(z\%) < 0.8!$

regelen: P, PD en PI : welke voldoet?

verboden gebieden eisen aangeven:

(i) stabiliteit:

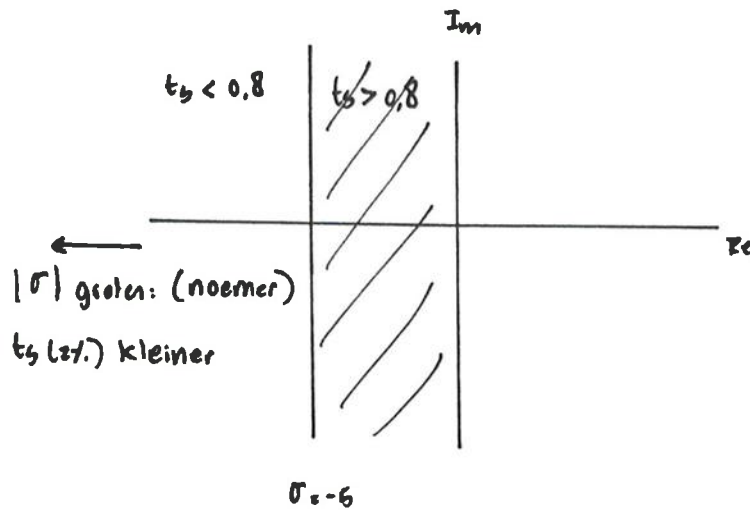


(ii) $t_s(zf.) < 0,8$

$$t_s(zf.) = \frac{4}{|\sigma|}$$

$$\frac{4}{|\sigma|} = 0,8 \quad |\sigma| = \frac{4}{0,8} = 5$$

$$\sigma = -5$$



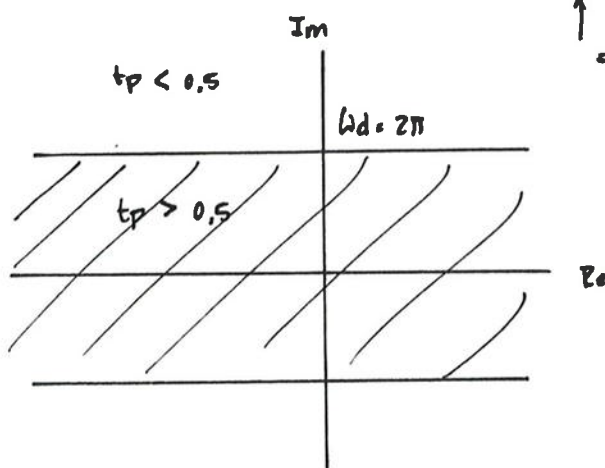
iii $t_p < 0,5$ seconden

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d}$$

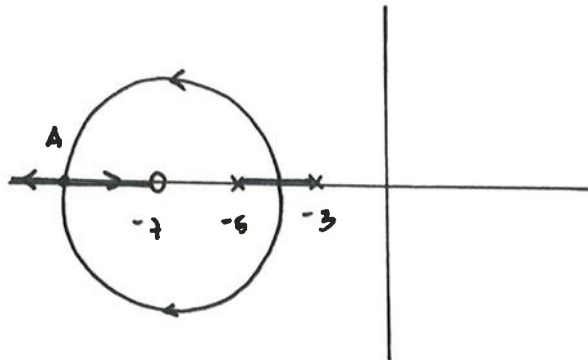
$$\frac{\pi}{\omega_d} = 0,5$$

$$\omega_d = \frac{\pi}{0,5} = 2\pi$$

$\uparrow$
= ω_d gedempte eigentrequentie
(Im-ax)



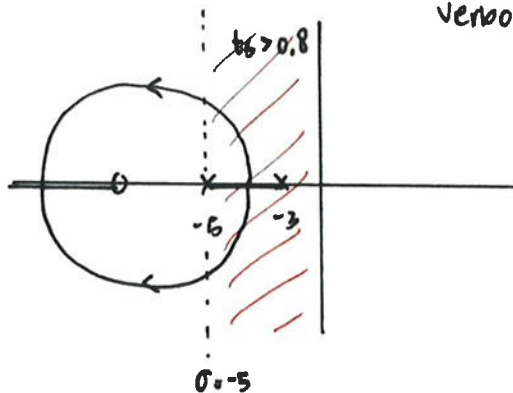
5a. P geregelde systeem



5d. • Stabiel s

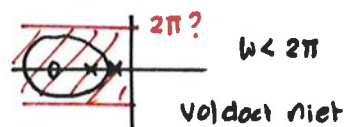
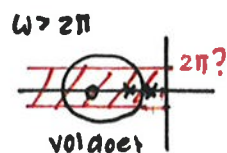
• $t_s (??) < 0,8$ mogelijk? $|\sigma| > 5$

→ Is mogelijk: Poolbaan komt links van
verboden gebied.



• $t_p < 0,5$ mogelijk? $\omega > 2\pi$

→ Hoogte van cirkel bepalen: lager of hoger dan 2π ?
(straal)



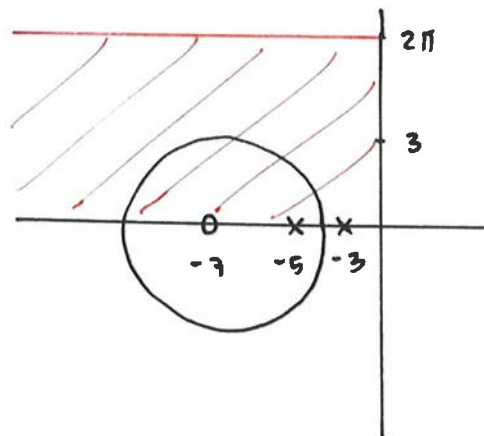
3.

globale berekening:

-7 is middelpunt vd cirkel, uitbreekpunt ≈ -4

$\rightarrow \sin 2\pi \approx 3$

hoogte cirkel $\approx 3 \ll 2\pi$!



$t_p < 0,5$ niet mogelijk!

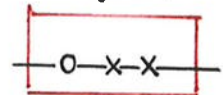
5b.

PI - regeling:

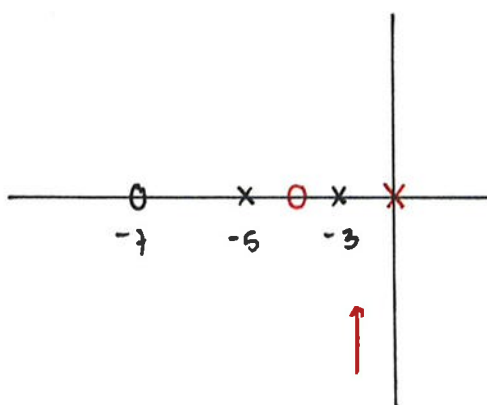
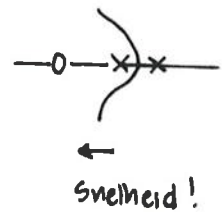
- pool in de oorsprong
- nulpunt zelf kiezen.

Vuistregel:

volgorde:

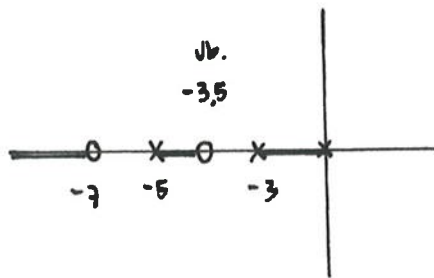


immers:

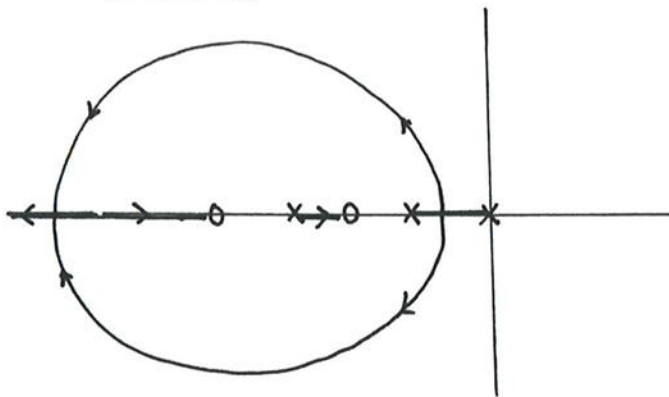


O x x volgorde

4.



Poolbaan:



• asymptoten: $n-m$

$$= 3 - 2 = 1$$

→ 180°

(d hoeft niet bepaald te worden bij 1 asymptoot)

5d.

• systeem is stabiel &

• $e_{ss} = 0$!

• $t_s(z.f.) < 0,8$ mogelijk?

* poolbaan komt links van lijn $\sigma = -6$

* maar: langzaam totje $x \rightarrow 0$!
-5 -3,5

→ $t_s < 0,8$ niet mogelijk

• $t_r < 0,5$? → hoogte cirkel nagaan

glovaal: middelpunt -7, uitbreekpunt $\approx -1,5$

$$5,5 < 2\pi$$

nodig: $5,5 > 2\pi > 6,28$ uitbreekpunt $\sigma = -0,72$

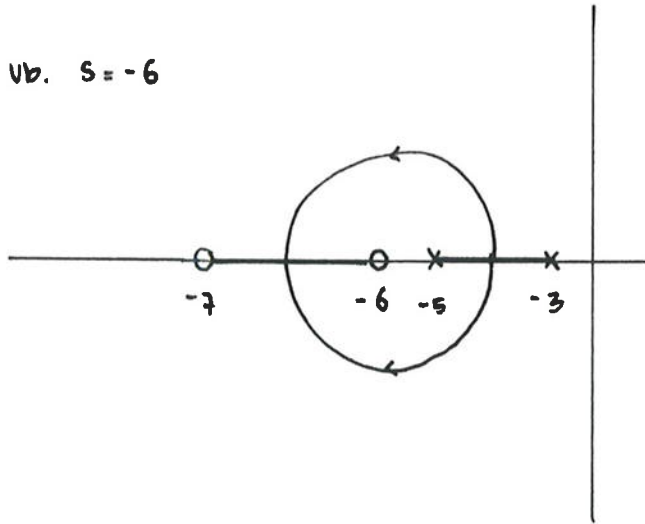
niet te verwachten (berekening niet nodig)

5.

5c PD regeling: nulpunt toevoegen

zodat volgorde: $0 \times \times$ (in ieder geval)

vb. $s = -6$



5d:

- Stabiel ℓ
- $t_s (7\%) < 0,8$ mogelijk: poolbaan komt links van lijn $\sigma = -5$
- $t_p < 0,5$ niet mogelijk

→ straal cirkel kleiner dan bij P en PI $\ll 2\pi$

→ is er nog een betere positie voor dit nulpunt dan $s = -6$? leg uit!

Controleer je antwoorden van opg. 5 in Matlab!