KU LEUVEN

Meet- en Regeltechniek

Les 9: Systeemidentificatie en regelaarsinstelling

Prof. dr. ir. Toon van Waterschoot

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen
ESAT – Departement Elektrotechniek
KU Leuven, Belgium

Meet- en Regeltechniek: Vakinhoud

- **Deel 1: Systeemtheorie**
  - Les 1: Inleiding en modelvorming
  - Les 2: Systemen van eerste orde
  - Les 3: Systemen van tweede & hogere orde en met dode tijd
- **Deel 2: Analoge regeltechniek**
  - Les 4: De regelkring
  - Les 5: Het wortellijnendiagram
  - Les 6: Oefeningen wortellijnendiagram
  - Les 7: De klassieke regelaars
  - Les 8: Regelaarontwerp + oefeningen
  - Les 9: Systeemidentificatie en regelaarsinstelling
  - Les 10: Speciale regelstructuren
  - Les 11: Niet-lineaire regeltechniek & aan-uit regelaars
- **Deel 3: Digitale regeltechniek**
  - Les 12: Het discreet systeemgedrag & het discreet equivalent
  - Les 13: De discrete regelkring & de toestandsregelaar

Les 9: Systeemidentificatie en regelaarsinstelling

- **Systeemidentificatie en regelaarsinstelling** [Baeten, REG1, Hoofdstuk 6]
  - Trial & error regelaarsinstelling (*niet in cursustekst!*)
  - Ziegler-Nichols regelaarsinstelling (*niet in cursustekst!*)
  - Eenvoudige systeemidentificatiemethodes (*niet in cursustekst!*)
  - Bedragsoptimum
  - Symmetrisch optimum

KU LEUVEN

Trial & error regelaarsinstelling

- **Regeltjes:**
  - Stel eerst de P-waarde in zodat de standfout minimaal is en de regelaar na 2-3 slingeringen redelijk stabiel is (hoge versterking).
  - Voer de I-waarde op totdat de regelaar redelijk snel op de goede eindwaarde komt.
  - Stel de D-waarde in zodat de regelaar sneller op de gewenste waarde komt zonder dat de regeling te onrustig wordt.

Trial & error regelaarsinstelling

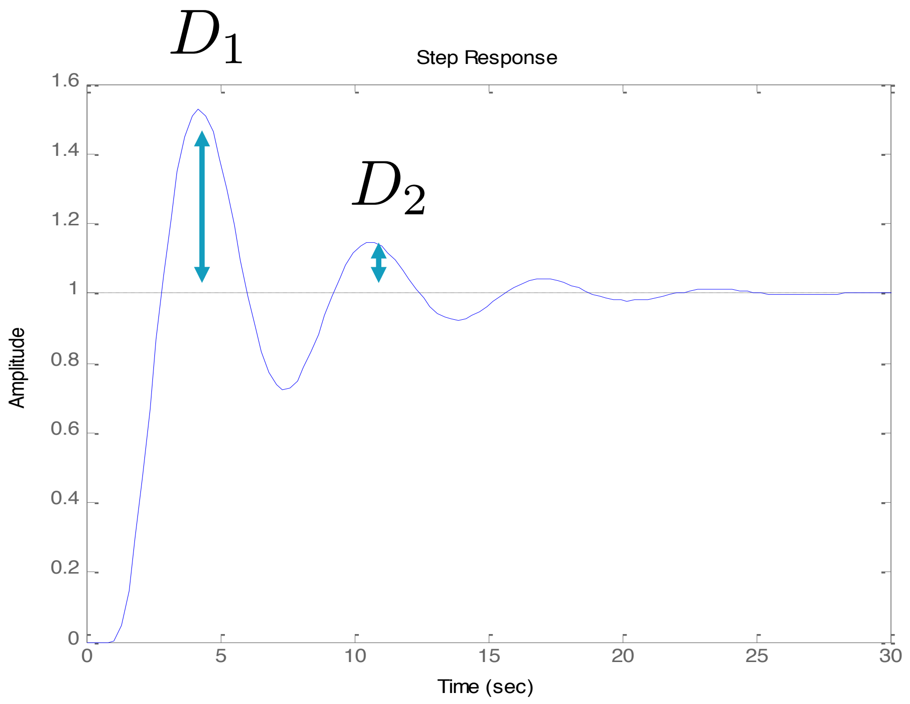
- **Opmerking:**
  - Voor processen met veel storing bij een D-actie → gebruik PI regeling (bv. bij elektromotoren)
  - Gegeven dat elke parameter (P,I,D) typisch kan variëren van 0,01 tot 100 en dat de vertragingstijden in het proces groot kunnen zijn kan dit een langdurige opgave zijn

Les 9: Systeemidentificatie en regelaarsinstelling

- **Systeemidentificatie en regelaarsinstelling** [Baeten, REG1, Hoofdstuk 6]
  - Trial & error regelaarsinstelling (*niet in cursustekst!*)
  - Ziegler-Nichols regelaarsinstelling (*niet in cursustekst!*)
  - Eenvoudige systeemidentificatiemethodes (*niet in cursustekst!*)
  - Bedragsoptimum
  - Symmetrisch optimum

Ziegler-Nichols regelaarsinstelling

- Empirische doelstellingen:
  - verval ratio $\frac{D_2}{D_1} \approx \frac{1}{4}$
  - standfout = 0

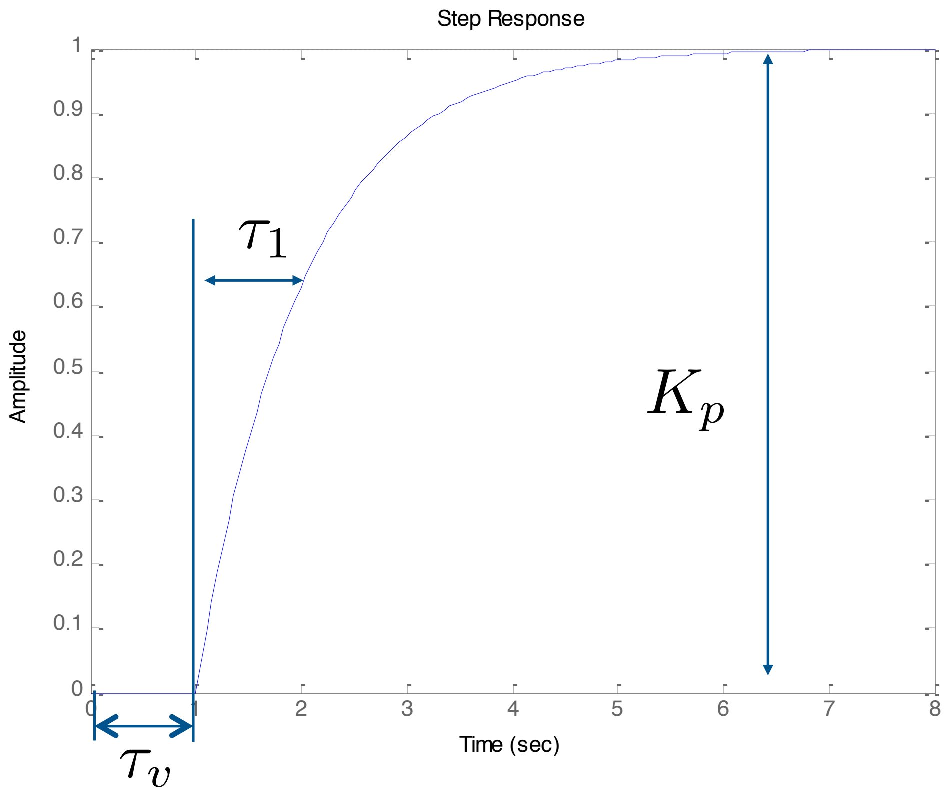


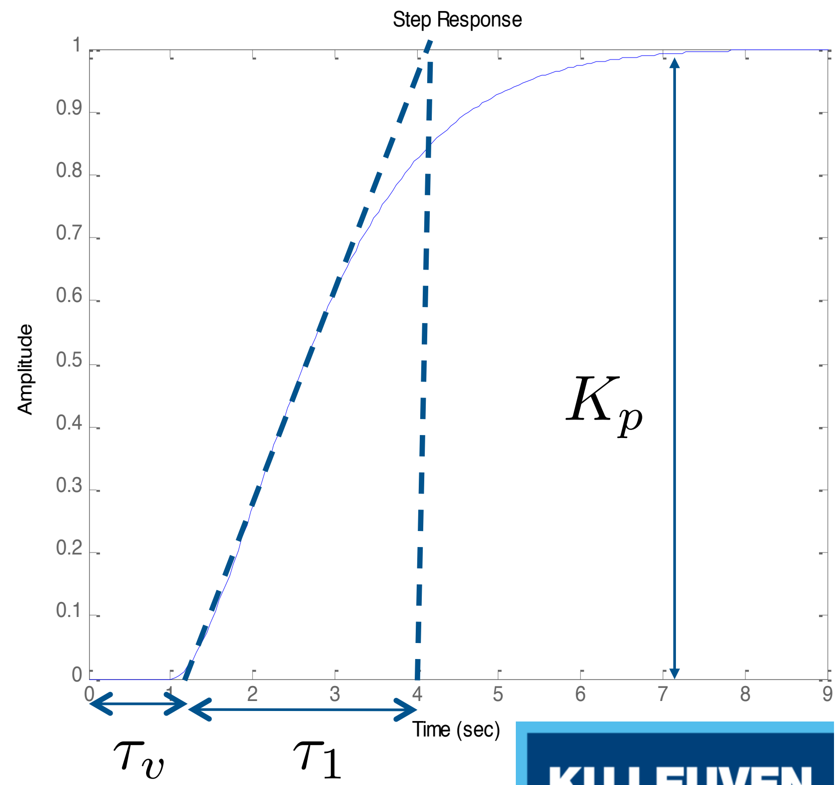
- Ziegler-Nichols instelling geeft vuistregeltjes zodat aan bovenstaande doelstellingen tegemoet gekomen wordt

KU LEUVEN

Ziegler-Nichols regelaarsinstelling

- **ZN instelling 1**: Gebaseerd op stapresponsie van het **ongeregelde** systeem
  - Bepaal experimenteel parameters τ_1, K_p, τ_v





Ziegler-Nichols regelaarsinstelling

– Gebruik parameters voor regelaarsinstelling aan de hand van onderstaande tabel.

	K_rK_p	$P = K_r$	τ_i	$I = \frac{K_r}{\tau_i}$	τ_d	$D = K_r\tau_d$
P	$\frac{\tau_1}{\tau_v}$	$\frac{\tau_1}{\tau_v K_p}$	-	-	-	-
PI	$\frac{0{,}9\tau_1}{\tau_v}$	$\frac{0{,}9\tau_1}{\tau_v K_p}$	$3{,}3\tau_v$	$\frac{K_r}{3{,}3\tau_v}$	-	-
PID	$\frac{1{,}2\tau_1}{\tau_v}$	$\frac{1{,}2\tau_1}{\tau_v K_p}$	$2\tau_v$	$\frac{K_r}{2\tau_v}$	$0{,}5\tau_v$	$0{,}5K_r\,\tau_v$

– Let op met niet-lineariteiten: Trade-off tussen kleine stap (onnauwkeurig vooral bij veel stoorsignalen) en grote stap (proces kan anders reageren indien instelling te ver van het werkingspunt)

– Zie bv. ook Cohen en Coon tabel → andere formules

– [*Tan, 2006*], *"Comparison of some well-known PID tuning formulas"*

Ziegler-Nichols regelaarsinstelling

- **ZN instelling 2:** Gebaseerd op **proportioneel geregeld** systeem
  - maak het geregelde systeem marginaal stabiel
  - bepaal de volgende parameters (bv. a.h.v. staprespons):

    K_m : versterking waarop het systeem marginaal stabiel is

    $T_p = \dfrac{2\pi}{\omega_p}$: periode van de oscillatie
  - stel regelaar in volgens tabel:

	K_r	τ_i	τ_d
P	$\frac{K_m}{2,0}$	-	-
PI	$\frac{K_m}{2,2}$	$\frac{T_p}{1,2}$	-
PID	$\frac{K_m}{1,7}$	$\frac{T_p}{2,0}$	$\frac{T_p}{8,0}$

Ziegler-Nichols regelaarsinstelling

- **Opmerkingen**:
  - De amplitude van de oscillaties hangt af van het proces en kan niet gecontroleerd worden → aanvaardbaar?
  - Systeem marginaal stabiel maken zal niet kunnen tijdens productie!
  - Let op voor stoorsignalen, andere in cascade geschakelde regelaars, tijdens de instelling
  - Tijdens de instelling moeten de I en D actie van de regelaar afgezet worden → $\tau_d = \min \text{ en } \tau_i = \max$
  - Resultaat moet sinusoïdale oscillaties met constante amplitude geven, verwar niet met limietcycli ten gevolge van niet-lineariteiten.
    - limietcycli = niet-sinusoïdale oscillaties met constante amplitude
    - check regelaarsuitgang!!

KU LEUVEN

Ziegler-Nichols regelaarsinstelling

- **Opmerkingen:**
  - Omdat het een empirische methode is, worden de regelaarparameters niet optimaal geschat.
  - Veel digitale regelaars kunnen zelfstandig een optimum vinden (“**autotuning**”). Hiervoor wordt vaak Ziegler-Nichols gebruikt. Tijdens de autotuning wordt de regelfunctie even uitgezet om de instelling te berekenen via een stapresponsie.

KU LEUVEN

Les 9: Systeemidentificatie en regelaarsinstelling

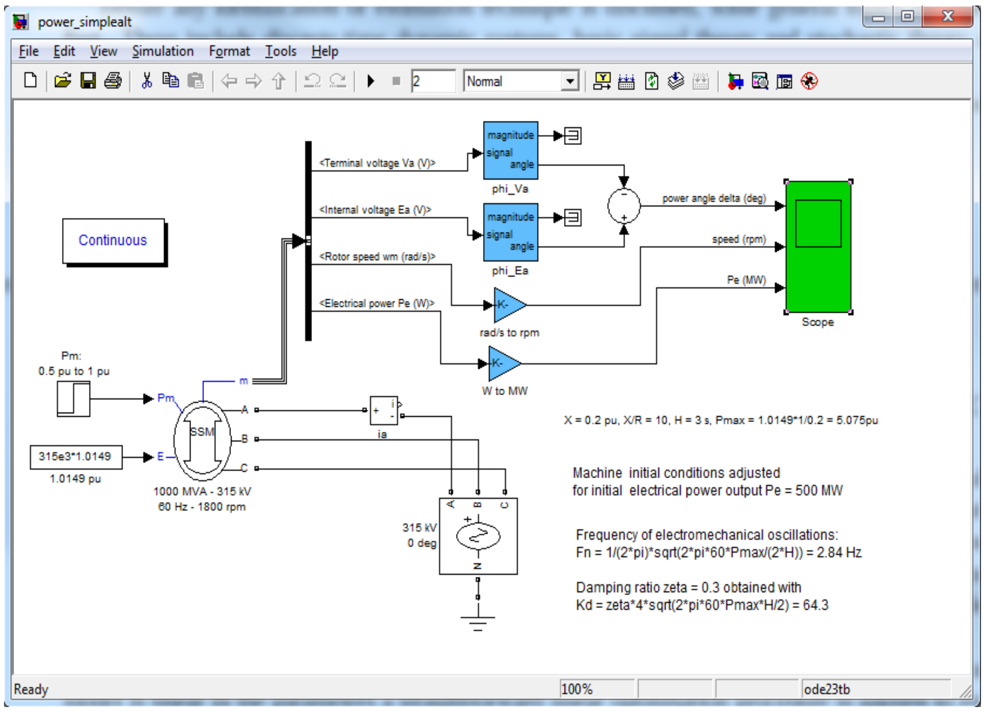
- **Systeemidentificatie en regelaarsinstelling** [Baeten, REG1, Hoofdstuk 6]
  - Trial & error regelaarsinstelling (*niet in cursustekst!*)
  - Ziegler-Nichols regelaarsinstelling (*niet in cursustekst!*)
  - Eenvoudige systeemidentificatiemethodes (*niet in cursustekst!*)
  - Bedragsoptimum
  - Symmetrisch optimum

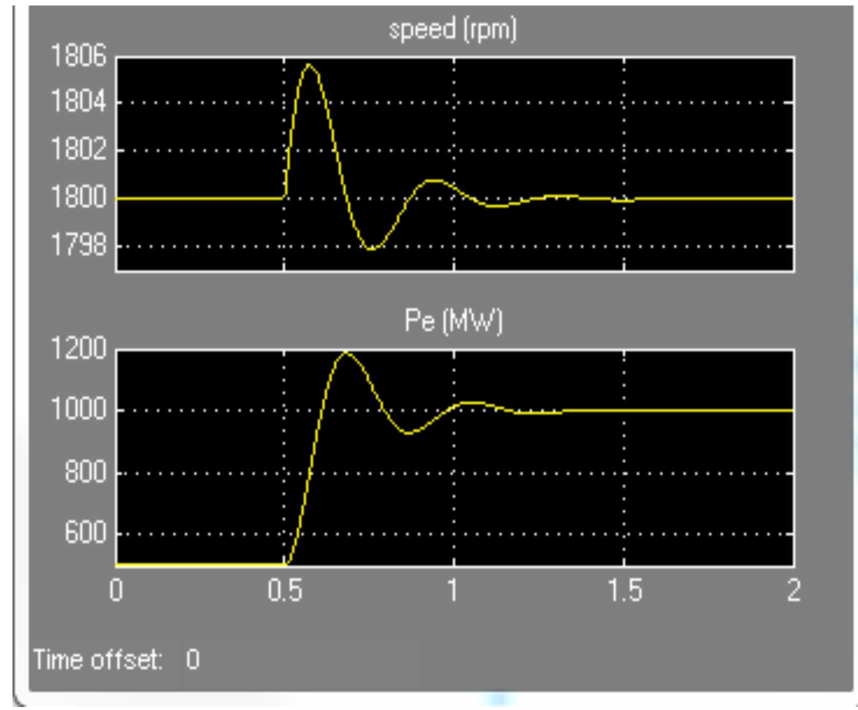
Eenvoudige systeemidentificatie

- **Doelstelling:**
  - optimale regelaarsinstellingen hangen af van transfertfunctie van te regelen systeem
  - bepalen van transfertfunctie op basis van gekend ingangs- en opgemeten uitgangssignaal = **systeemidentificatie**
- **Eenvoudige systeemidentificatie:**
  - berekening systeemparameters a.h.v. stapresponsie
  - berekening systeemparameters a.h.v. Bodediagram
- **Geavanceerde systeemidentificatie:**
  - keuze systeemmodel
  - berekening optimale modelparameters
  - komt aan bod in vak “Digital Signal Processing-2” (MELO)

Eenvoudige systeemidentificatie

- Voorbeeld: generator (Matlab: `power_simplealt`)

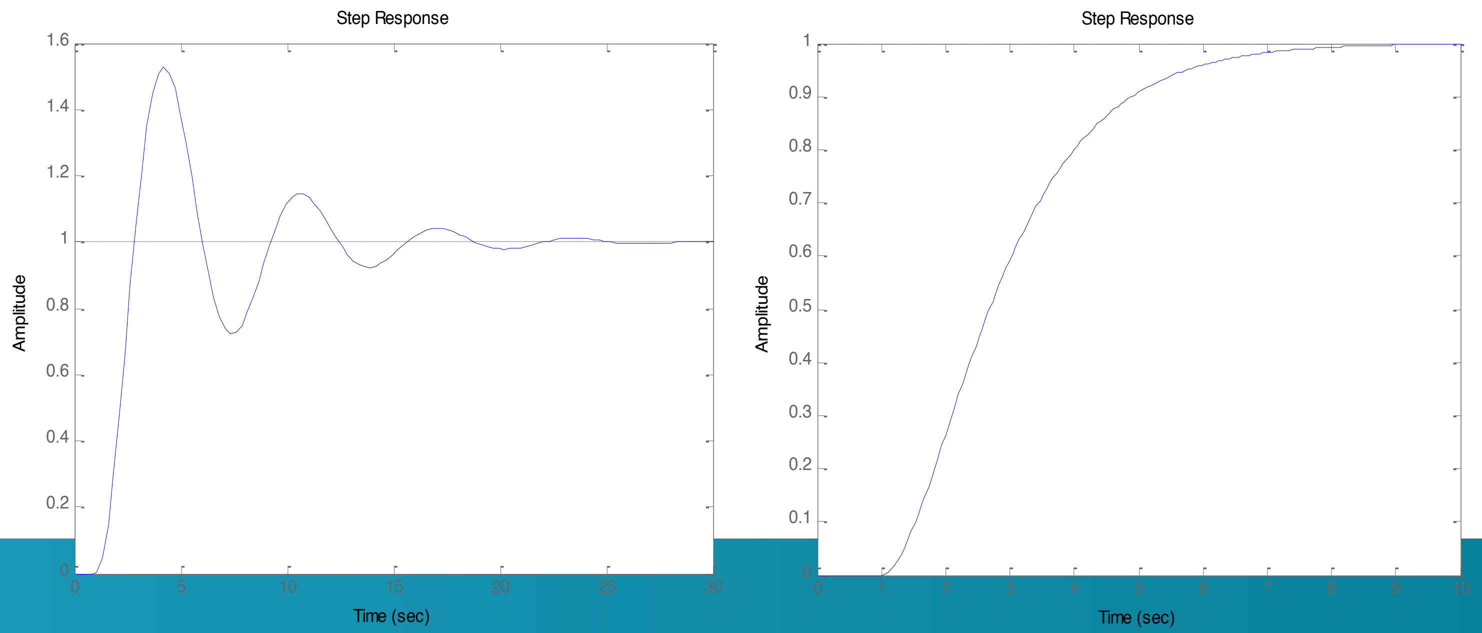




KU LEUVEN

Eenvoudige systeemidentificatie

- **Berekening systeemparameters a.h.v. stapresponsie**
  - Eerste orde systeem heeft een herkenbare stapresponsie (bepaal τ en K grafisch, zie Ziegler-Nichols instelling)
  - Tweede orde systeem met dode tijd kan onderstaande stapresponsies hebben
  - Hogere orde systemen worden vaak benaderd door tweede orde systeem



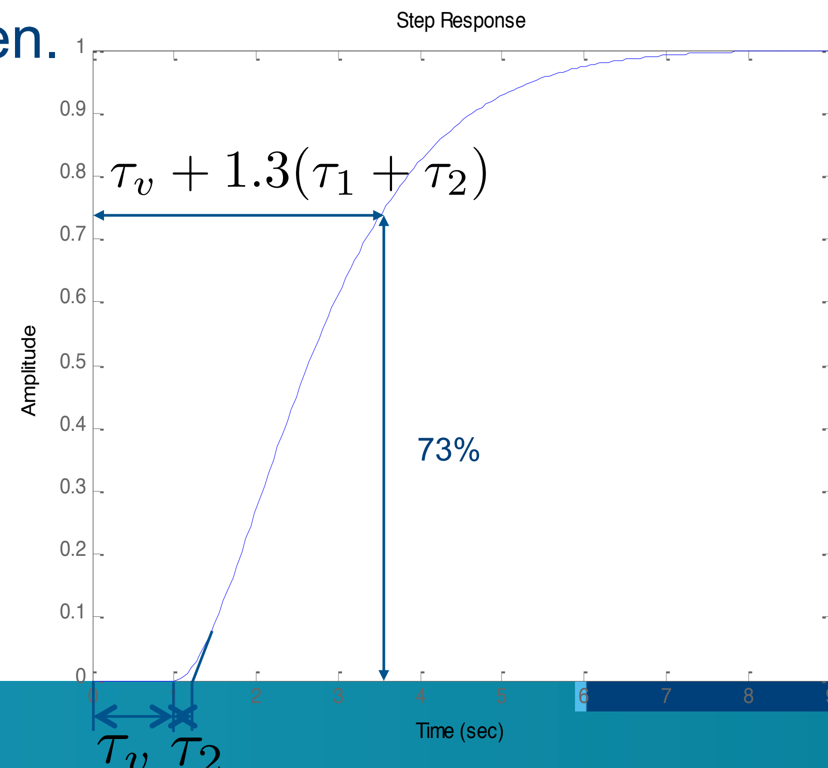
Eenvoudige systeemidentificatie

- Voor een 2de orde systeem <u>zonder doorschot</u> ($\zeta \geq 1$) is de stapresponsie 73% bij $t = \tau_v + 1.3(\tau_1 + \tau_2)$

  [Cool,Schijff, Viersma,1991]
- Lineariseer de exponentiële functie om τ_2 te vinden;

  τ_v kan makkelijk gevonden worden;

  τ_1 kan dan berekend worden.



Eenvoudige systeemidentificatie

- Een 2de orde systeem zonder doorschot ($\zeta \geq 1$) kan beschreven worden als een cascade van twee 1e orde systemen met tijdsconstanten

$$\begin{aligned}\tau_1 &= \frac{1}{\omega_n(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})} \\ \tau_2 &= \frac{1}{\omega_n(\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})}\end{aligned}$$

- Daaruit volgen de natuurlijke eigenpulsatie en dempingsfactor van het 2e orde systeem

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{\tau_1 \tau_2}}, \ \zeta = \frac{\tau_1 + \tau_2}{2\sqrt{\tau_1 \tau_2}}$$

KU LEUVEN

Eenvoudige systeemidentificatie

- Voor een 2de orde systeem met doorschot ($\zeta < 1$) bepalen we de dempingsfactor ζ a.h.v. het doorschot *D*

$$\zeta = -\frac{\ln(D)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(D)}}$$

en de gedempte eigenpulsatie ω_p a.h.v. oscillatieperiode T_p

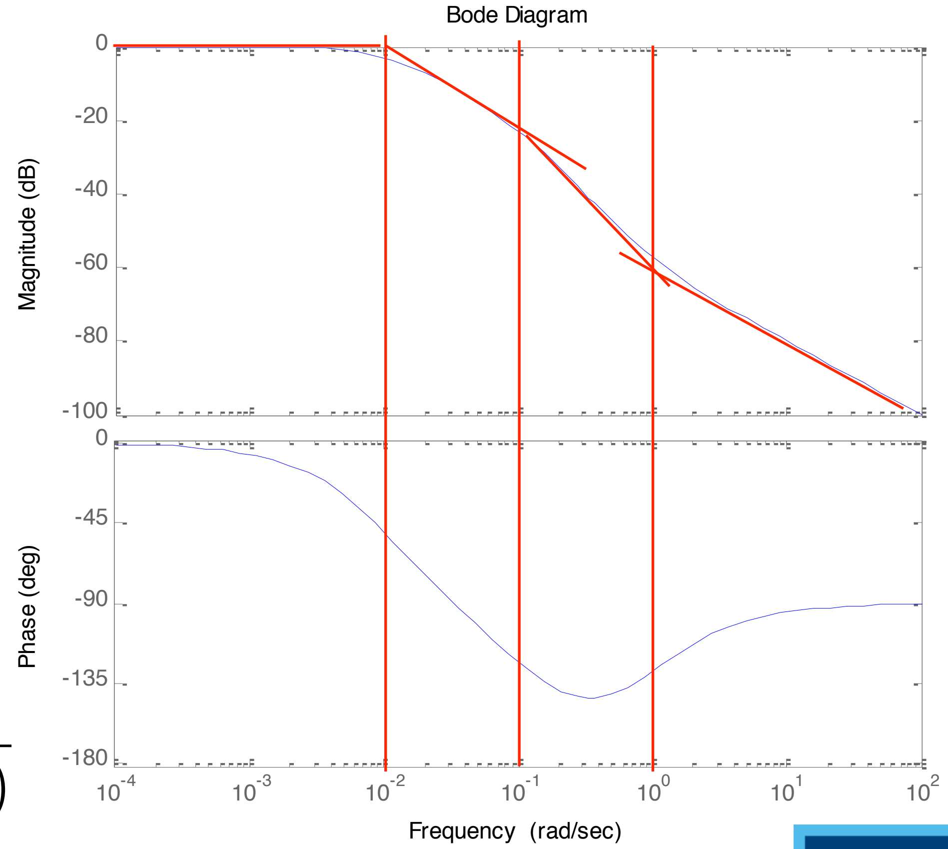
$$\omega_p = \frac{2\pi}{T_p}$$

Eenvoudige systeemidentificatie

- **Berekening systeemparameters a.h.v. Bodediagram:**
  - Leg een breedbandig ingangssignaal aan
  - Meet uitgangssignaal op
  - Teken Bodediagram
  - Teken asymptoten, het snijpunt bepaalt de eigenfrequentie
  - Indien daling asymptoot 20dB/decade → 1ste orde proces

Eenvoudige systeemidentificatie

- **2de orde proces:**
  - $\zeta \leq 1$ → daling 40dB/decade voor frequenties na de eigenfrequentie
  - $\zeta > 1$ → zie figuur



  - oplossing:

$$\frac{p+1}{(10p+1)(100p+1)}$$

KU LEUVEN

Eenvoudige systeemidentificatie

- **Opmerking**:
  - in de meeste gevallen zijn de ‘knie’-punten niet zo makkelijk te vinden…

Les 9: Systeemidentificatie en regelaarsinstelling

- **Systeemidentificatie en regelaarsinstelling** [Baeten, REG1, Hoofdstuk 6]
  - Trial & error regelaarsinstelling (*niet in cursustekst!*)
  - Ziegler-Nichols regelaarsinstelling (*niet in cursustekst!*)
  - Eenvoudige systeemidentificatiemethodes (*niet in cursustekst!*)
  - Bedragsoptimum
  - Symmetrisch optimum

Bedragsoptimum

- **Doel?** Regelaar ontwikkelen die snel, juist en zonder veel overgangsverschijnselen de gewenste waarde bereikt
- **Hoe?** Optimaliseren:
  - bedragsoptimum
  - symmetrisch optimum

Bedragsoptimum

- Beschouw de transfertfunctie van een 2de orde systeem:

$$TF = H(p) = \frac{a_0}{a_0 + a_1 p + a_2 p^2}$$

- Ideaal gedrag? $|TF(j\omega)| = 1$
- Waarom? regelaar volgt perfect referentie (geen vertraging, doorschot, …)
- Voorwaarde?

$$|H(j\omega)| = \sqrt{\frac{a_0^2}{a_0^2 + \omega^2(a_1^2 - 2a_0a_2) + \omega^4 a_2^2}} = 1$$

- Voldoende voorwaarden? $\cancel{a_2 = 0}$ en $a_1^2 - 2a_0a_2 = 0$

KU LEUVEN

Bedragsoptimum

- Om zo lang mogelijk aan deze voorwaarde te voldoen, kiezen we $a_1 = \sqrt{2a_0a_2}$
- Resultaat?

$$H(p)_{opt} = \frac{a_0}{a_0 + p\sqrt{2a_0a_2} + p^2a_2} = \frac{1}{1 + p\sqrt{\frac{2a_2}{a_0}} + p^2\left(\frac{a_2}{a_0}\right)}$$

- Dit geeft $\omega_n = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}}$ en $\zeta = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$ (= 4% doorschot)
- Door $2\sigma = \sqrt{\frac{2a_2}{a_0}}$ te stellen krijgen we de geslotenlus TF bij bedragsoptimum:

$$\boxed{H(p)_{BO} = \frac{1}{1 + p2\sigma + p^2 2\sigma^2}}$$

Bedragsoptimum

- Voor een regelkring met eenheidsterugkoppeling stemt dit overeen met een openlus TF

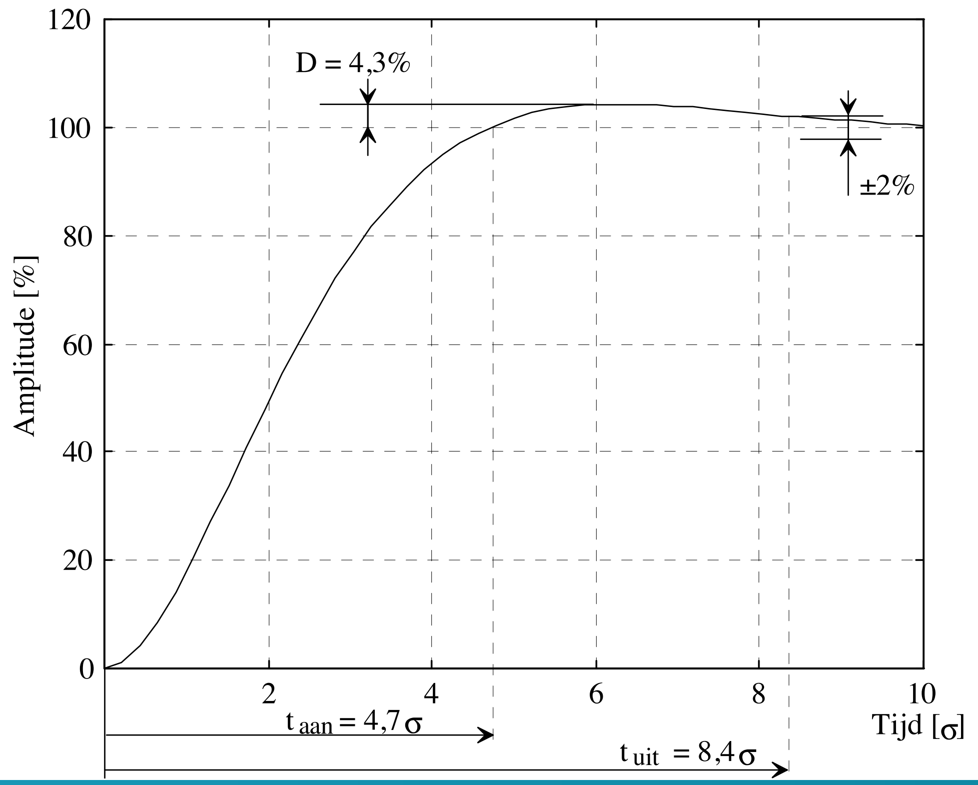
$$H(p)_{BO,open} = \frac{1}{p2\sigma(1+p\sigma)}$$

- De PID-parameters K_r, τ_i, τ_d worden dan ingesteld om de volgende openlus TF te bekomen:

$$K_r\left(1+\frac{1}{\tau_i p}\right)(1+\tau_d p)\cdot TF_{systeem} = \frac{1}{p2\sigma(1+p\sigma)}$$

Bedragsoptimum

- **Voorbeeld:**
  - staprespons van een regelkring geoptimaliseerd volgens BO
  - enige vrije parameter σ bepaalt snelheid van systeem (~ tijdsconstante)



Bedragsoptimum

- Bij toepassing van een **I-actie** mag het systeem geen zuivere integrator bevatten om het BO te kunnen bepalen. De openlus TF bevat dan altijd 1 zuivere integrator:

$$H(p)_{BO,open} = \frac{1}{p2\sigma(1+p\sigma)}$$

- Bij PI- of PID-regelaar moet de **I- of de D-actie** respectievelijk de grootste en eventueel de 2de grootste τ compenseren. Voor kan de som van (ongecompenseerde) kleinste τ genomen worden.
- Een BO geoptimaliseerde kring kan vereenvoudigd worden tot een 1^{e} orde systeem met $\tau = 2\sigma$

KU LEUVEN

Bedragsoptimum

- **Vuistregels bedragsoptimum:**
  - neem voor τ_i de grootste tijdsconstante van *G*
  - neem voor τ_d de tweede grootste tijdsconstante
  - neem voor σ de som van alle overige tijdsconstanten

- **Oefeningen** (thuis!):
  - Baeten, REG1, Hoofdstuk 6, pagina 6.4

Les 9: Systeemidentificatie en regelaarsinstelling

- **Systeemidentificatie en regelaarsinstelling** [Baeten, REG1, Hoofdstuk 6]
  - Trial & error regelaarsinstelling (*niet in cursustekst!*)
  - Ziegler-Nichols regelaarsinstelling (*niet in cursustekst!*)
  - Eenvoudige systeemidentificatiemethodes (*niet in cursustekst!*)
  - Bedragsoptimum
  - Symmetrisch optimum

KU LEUVEN

Symmetrisch optimum

- Beschouw een karakteristiek van 3de orde systeem

$$TF = H(p) = \frac{a_0 + pa_1}{a_0 + pa_1 + p^2 a_2 + p^3 a_3}$$

- Ideaal gedrag?

$$|TF(\omega)| = 1$$

- Voorwaarde?

$$|H(j\omega)| = \sqrt{\frac{a_0^2 + \omega^2 a_1^2}{a_0^2 + \omega^2(a_1^2 - 2a_0 a_2) + \omega^4(a_2^2 - 2a_1 a_3) + \omega^6 a_3^2}} = 1$$

Symmetrisch optimum

- Voldoende voorwaarden?

$$\cancel{a_1 = 0, a_3 = 0,}\ a_1^2 = 2a_0a_2 \text{ en } a_2^2 = 2a_1a_3 \Rightarrow a_3 = \frac{\left(\frac{a_1^2}{2a_0}\right)^2}{2a_1} = \frac{a_1^3}{8a_0^2}$$

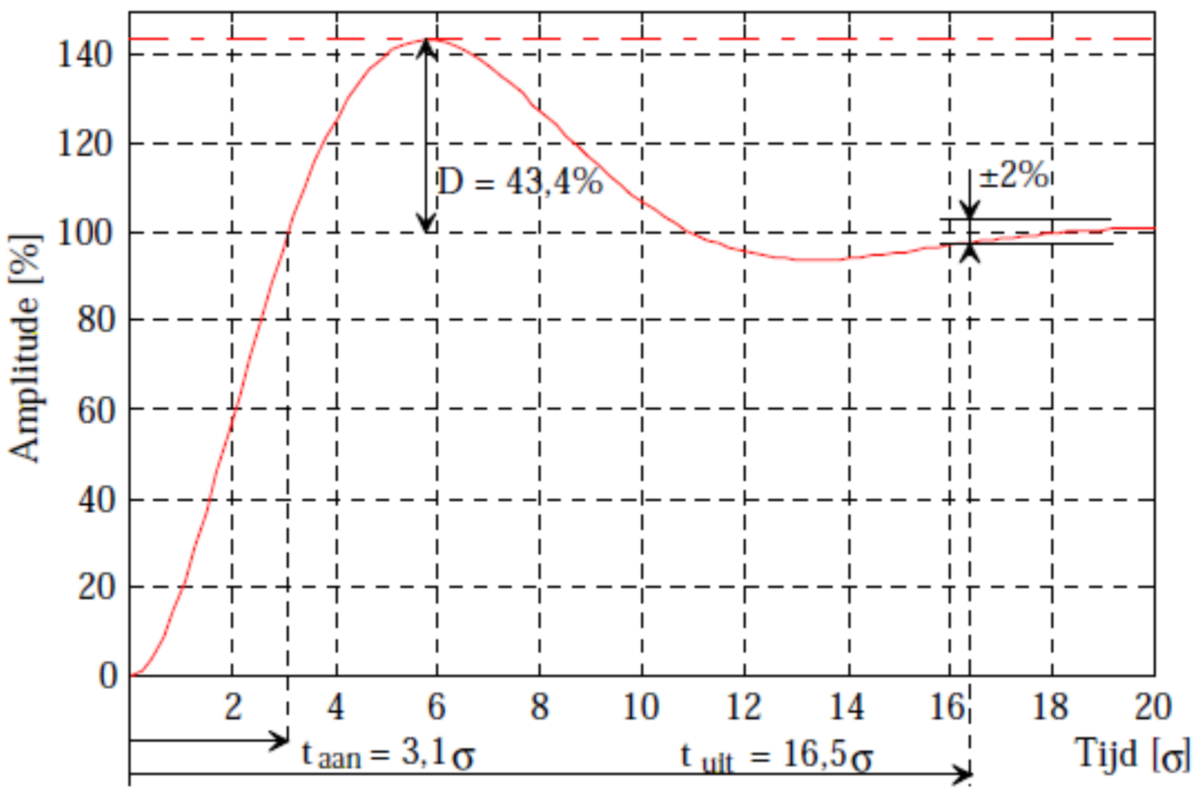
- Resultaat?

$$\begin{aligned} H(p)_{opt} &= \frac{1 + p\frac{a_1}{a_0}}{1 + p\frac{a_1}{a_0} + p^2\frac{a_1^2}{2a_0^2} + p^3\frac{a_1^3}{8a_0^3}} \\ &= \frac{1 + p4\sigma}{1 + p4\sigma + p^2 8\sigma^2 + p^3 8\sigma^3} \quad \left(\text{met } 4\sigma = \frac{a_1}{a_0}\right) \end{aligned}$$

Symmetrisch optimum

- Voor een systeem met eenheidsterugkoppeling wordt de openlus TF dan:

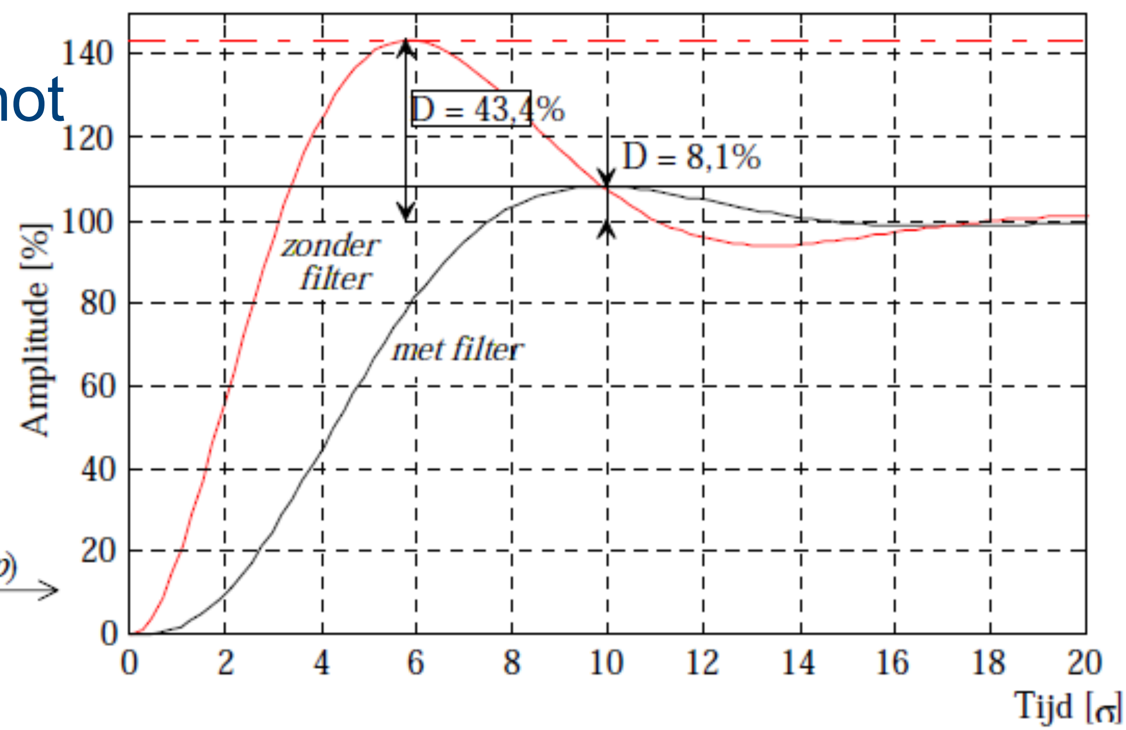
$$H(p)_{SO,open} = \frac{1 + p4\sigma}{8\sigma^2 p^2 (1 + p\sigma)}$$

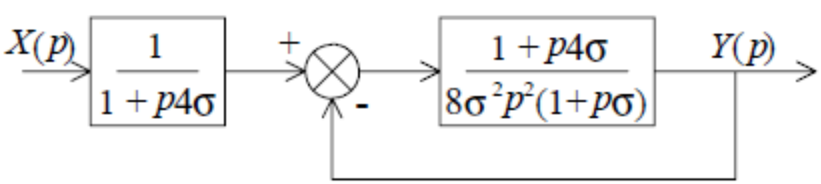


KU LEUVEN

Symmetrisch optimum

- Snelheidsfout → 0 door dubbele integratie in gesloten lus
- Probleem: zeer groot doorschot (43,3%)
- Oplossing: vertraging ingangssignaal via filter met als tijdsconstante 4σ zodat het nulpunt (differentiator) wordt ingeperkt !!
- Gevolg: 8.1% doorschot





Symmetrisch optimum

- **Vuistregels bedragsoptimum:**
  - neem voor τ_i de grootste tijdsconstante van *G*
  - neem voor τ_d de tweede grootste tijdsconstante
  - neem voor σ de som van alle overige tijdsconstanten

- **Oefeningen** (thuis!):
  - Baeten, REG1, Hoofdstuk 6, pagina 6.7

Samenvatting bedrags- en symmetrisch optimum

	soort regelaar	eigenschappen van proces	instelling regelaar
BEDRAGSOPTIMUM	P	$\tau_1 >> \sigma$	$K_r = \tau_1/(2K_p\sigma)$
	PI	$\tau_1 \leq 4\sigma$	$\tau_i = \tau_1$ $K_r = \tau_1/(2K_p\sigma)$
	PID	$\tau_1 \leq 4(\tau_2 + \sigma)$	$\tau_i = \tau_1$ $\tau_d = \tau_2$ $K_r = \tau_1/(2K_p\sigma)$
SYMMETRISCH OPTIMUM	PI	integrator τ_1 of $\tau_1 > 4\sigma$	$\tau_i = 4\sigma$ $K_r = \tau_1/(2K_p\sigma)$
	PID	integrator τ_1 en τ_2 of $\tau_1 > 4(\tau_2 + \sigma)$	$\tau_i = 4\sigma$ $\tau_d = \tau_2$ $K_r = \tau_1/(2K_p\sigma)$

***Tabel 6.1**: Keuze van regelaar en bijbehorende instelling.*

KU LEUVEN

Bijkomende literatuur (optioneel)

Wen Tan, Jizhen Liu, Tongwen Chen, Horacio J. Marquez, "Comparison of some well-known PID tuning formulas", *Computers and Chemical Engineering*, vol. 30, pp. 1416-1423, 2006.

(PDF op Toledo)