

---

## DE REGELAAR

---

### I. DE AAN/UIT-REGELAAR

1. Het regelcommando van de aan/uit-regelaar kan maar twee standen innemen: ofwel 'aan' (100%), ofwel 'uit' (0%).

Het moment dat door de regelaar een schakelactie wordt ondernomen, wordt bepaald door de ingestelde schakeldifferentie of 'dode band'. De schakeldifferentie heeft een onder- ( $e_{LL}$ ) en een bovengrens ( $e_{HL}$ ). Een schakelactie vindt plaats van zodra de deviatie  $e$  (d.i. het verschil tussen de gemeten procesgrootte  $PV$  en het setpunt  $SP$ ) de ondergrens  $e_{LL}$  ( $PV_{LL} - SP$ ) overschrijdt; de omgekeerde schakelactie zal plaatsvinden als de deviatie  $e$  de bovengrens  $e_{HL}$  ( $PV_{HL} - SP$ ) overschrijdt. Zolang de deviatie  $e$  zich tussen de onder- en de bovengrens van de dode band bevindt, wordt de laatste schakelactie aangehouden.

2. Als de regelaar direct werkend is ingesteld, zal een overschrijding van de bovengrens  $e_{HL}$  resulteren in een 'aan'-schakelactie en een onderschrijding van de ondergrens  $e_{LL}$  resulteren in een 'uit'-schakelactie van de regelaar.

Omgekeerd, als de regelaar indirect werkend is ingesteld, zal een overschrijding van de bovengrens  $e_{HL}$  resulteren in een 'uit'-schakelactie en een onderschrijding van de ondergrens  $e_{LL}$  resulteren in een 'aan'-schakelactie van de regelaar.

In het geval van een aan/uit-regeling van de ruimteverwarming moet de regelaar indirect werkend ingesteld worden. Overschrijdt de deviatie  $e$  (het verschil tussen de gemeten en de gewenste ruimtetemperatuur) de ingestelde bovengrens ( $T_r - SP \geq e_{HL}$ ), dan moet de verwarming worden uitgeschakeld (regelklep volledig dicht). Omgekeerd, onderschrijdt de deviatie  $e$  de ingestelde ondergrens ( $T_r - SP \leq e_{LL}$ ), dan moet de verwarming opnieuw ingeschakeld worden (regelklep volledig open).

3. In processen met een looptijd (bv. te wijten aan een meetvertraging van de procesgrootte en/of te wijten aan de benodigde reactietijd van het corrigerend orgaan) zal de aan/uit-regeling onvermijdelijk resulteren in 'overshoot' en 'undershoot' van de procesgrootte, d.w.z. dat de procesgrootte de grenzen van de schakeldifferentie over- resp. onderschrijdt.

Om schommelingen van de procesgrootte te beperken, kan de schakeldifferentie kleiner worden gemaakt, maar dit kan dan weer tot nadeel hebben dat de schakelfrequentie van het corrigerend orgaan ontoelaatbaar groot wordt (bv. wegens versnelde slijtage van de regelklep). Het verkleinen van de schakeldifferentie zal bovendien niks kunnen veranderen aan de mate van over- en undershoot die te wijten is aan de looptijden in de regelkring. Looptijden kunnen eventueel worden beperkt door ervoor te zorgen dat de meetvertraging van de procesgrootte zo kort mogelijk blijft.

Nog een andere mogelijkheid om over- en undershoot van de procesgrootte tegen te gaan is door ervoor te zorgen dat de momentane energietoevoer aan het proces zoveel mogelijk op de momentane procesbelasting is afgestemd. In het geval van ruimteverwarming kan de over- of undershoot van de ruimtetemperatuur bv. worden beperkt door de wateraanvoertemperatuur naar de verwarmingslichamen aan te passen afhankelijk van de heersende buitentemperatuur, die de procesbelasting bepaalt.

## II. DE PROPORTIONELE REGELAAR (P-REGELAAR)

1. De regelactie van de P-regelaar heeft de algemene gedaante:

$$OUT = \pm |K_r'| (PV - SP) + B \quad (1)$$

- $OUT$  is het uitgangssignaal van de regelaar (het regelcommando).
- $PV - SP$  is de afwijking (de deviatie  $e$ ) tussen de gemeten waarde van de procesgrootte  $PV$  en het ingestelde setpunt  $SP$  van de regelaar.
- $B$  stelt de ingestelde 'bias' van de regelaar voor. Het is het regelcommando dat de regelaar zal uitsturen wanneer de deviatie nul is ( $PV = SP$ ).
- $|K_r'|$  is de absolute versterkingsfactor van de regelaar.

Het regelcommando  $OUT$  van de P-regelaar is recht evenredig met de afwijking van de procesgrootte  $PV$  t.o.v. het ingestelde setpunt  $SP$ .

Een regelaar kan direct (+) of indirect (-) werkend zijn.

In het geval van een direct werkende regelaar neemt het regelcommando  $OUT$  toe, als de procesgrootte  $PV$  het setpoint  $SP$  meer overschrijdt ( $PV > SP$ ) en omgekeerd, zal het regelcommando  $OUT$  afnemen als de procesgrootte  $PV$  het setpoint  $SP$  meer onderschrijft ( $PV < SP$ ).

In het geval van een indirect werkende regelaar geldt dan precies het omgekeerde.

## 2. Procentuele regelaarvergelijking

Een regelaar bezit een zeker meetbereik. De gemeten proceswaarde kan daarmee in procenten van het meetbereik worden uitgedrukt:

$$PV(\%) = \frac{PV - PV_{min}}{PV_{max} - PV_{min}} \times 100 \quad (2)$$

$$\Rightarrow PV = PV_{min} + \frac{PV(\%)}{100} \cdot (PV_{max} - PV_{min})$$

Op analoge wijze kan ook het setpoint  $SP$  van de regelaar in procenten van het meetbereik worden uitgedrukt.

Daarnaast bezit de regelaar over een zeker regelbereik, d.w.z. dat het regelcommando elke waarde kan aannemen in een interval  $[OUT_{min}; OUT_{max}]$ . Het regelcommando kan daarmee worden uitgedrukt in procenten van het regelbereik:

$$OUT(\%) = \frac{OUT - OUT_{min}}{OUT_{max} - OUT_{min}} \times 100 \quad (3)$$

$$\Rightarrow OUT = OUT_{min} + \frac{OUT(\%)}{100} \cdot (OUT_{max} - OUT_{min})$$

Op analoge wijze kan ook de bias  $B$  van de regelaar in procenten van het regelbereik worden uitgedrukt.

Door toepassing van vgl. (2) en (3) kan vgl. (1) nu uitgewerkt worden tot:

$$OUT(\%) = \pm |K_r| [PV(\%) - SP(\%)] + B(\%) \quad (4)$$

met de procentuele versterkingsfactor:

$$|K_r| = \frac{PV_{max} - PV_{min}}{OUT_{max} - OUT_{min}} |K'_r| \quad (5)$$

Het procentuele regelcommando  $OUT(\%)$  kan elke waarde aannemen tussen 0% en 100%. Zo kunnen we het regelcommando 0% bv. interpreteren als "regelklep volledig dicht" en het regelcommando 100% als "regelklep volledig open".

### 3. Regelaarkarakteristiek

Vgl. (1) en vgl. (4) zijn de vergelijkingen van een rechte  $OUT = f(PV)$ .

In de regelaarkarakteristiek wordt het regelcommando  $OUT$  evenwel uitgezet langs de horizontale  $x$ -as en de procesgrootte  $PV$  langs de verticale  $y$ -as.

Een verandering van het setpoint  $SP$  (op de  $y$ -as) verschuift de regelaarkarakteristiek verticaal. Een verandering van de bias  $B$  (op de  $x$ -as) verschuift de regelaarkarakteristiek dan weer horizontaal.

### 4. Proportionele band

De proportionele band  $PB$  is per definitie het gedeelte van het meetbereik dat de procesgrootte  $PV$  moet doorlopen om het regelcommando  $OUT$  over het volledige regelbereik van de regelaar uit te sturen (van 0% naar 100%). Passen we vgl. (1) toe op deze definitie, dan volgt daaruit een uitdrukking voor de proportionele band:

$$\begin{aligned}
 OUT_{min} &= \pm |K'_r| (PV_d - SP) + B \\
 OUT_{max} &= \pm |K'_r| (PV_u - SP) + B \\
 OUT_{max} - OUT_{min} &= |K'_r| \cdot |PV_u - PV_d| = |K'_r| \cdot PB \\
 \Rightarrow PB &= \frac{OUT_{max} - OUT_{min}}{|K'_r|} \quad (6)
 \end{aligned}$$

Vgl. (6) drukt uit dat de proportionele band  $PB$  gelijk is aan de verhouding van het regelbereik op de absolute versterkingsfactor  $K'_r$  van de regelaar. Dit kunnen we nu nog verder uitwerken m.b.v. vgl. (5):

$$\begin{aligned}
 PB &= \frac{OUT_{max} - OUT_{min}}{|K'_r|} = \frac{OUT_{max} - OUT_{min}}{\frac{OUT_{max} - OUT_{min}}{PV_{max} - PV_{min}} |K_r|} \\
 PB &= \frac{PV_{max} - PV_{min}}{|K_r|} \quad (7)
 \end{aligned}$$

Vgl. (7) drukt uit dat de proportionele band  $PB$  evenzeer gelijk is aan de verhouding van het meetbereik van de regelaar op de procentuele versterkingsfactor  $K_r$  van de regelaar.

Doorgaans wordt de proportionele band  $PB$  in procenten van het totale meetbereik uitgedrukt:

$$PB(\%) = \frac{PB}{PV_{max} - PV_{min}} \times 100 = \frac{100}{|K_r|} \quad (8)$$

Vgl. (8) leert dat een kleine proportionele band samengaat met een grote versterkingsfactor. Dit houdt in dat een kleine verandering van de deviatie (kleine verandering van de procesgrootte t.o.v. het setpoint) reeds een sterke verandering van het regelcommando zal veroorzaken: de regelaar reageert bruusk. Een te kleine proportionele band of een te grote versterkingsfactor i.f.v. het te regelen proces heeft een negatieve impact op de stabiliteit van de regeling: de procesgrootte zal zich onrustig gedragen en grote schommelingen vertonen.

### III. DE PID-REGLAAR

1. De PID-regelaar combineert drie verschillende regelacties:

- de P-regelactie of proportionele regelactie (cf. par. II)
- de I-regelactie of integrerende regelactie
- de D-regelactie of differentiërende regelactie

2. Het regelalgoritme van de PID-regelaar wordt beschreven door:

$$OUT(\%) = \pm |K_r| \left( e(\%) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(\%) dt + \tau_d \frac{de(\%)}{dt} \right) + B(\%) \quad (9)$$

Daarin is  $e(\%)$  de procentuele deviatie:

$$e(\%) = PV(\%) - SP(\%) \quad (10)$$

De procesgrootte  $PV(\%)$  en het setpunt  $SP(\%)$  zijn uitgedrukt in procenten van het meetbereik van de regelaar.

Het regelcommando  $OUT(\%)$  en de bias  $B(\%)$  van de regelaar zijn uitgedrukt in procenten van het regelbereik van de regelaar.

3. De I-regelactie vervult een accumulerende functie. Zolang de integraal van de deviatie (de 'geaccumuleerde deviatie') niet nul is, verandert het regelcommando  $OUT$  van de regelaar (weliswaar kan het regelcommando niet groter worden dan 100% of kleiner dan 0% van het regelbereik van de regelaar).

De instelbare parameter  $\tau_i$  wordt de integratietijd genoemd. Het is de tijd die de I-regelactie zou nodig hebben om dezelfde waarde van het regelcommando te bereiken als de P-regelactie, zou de deviatie  $e$  vanaf 0 ineens stapvormig veranderen en daarna constant blijven in de tijd. De P-regelactie zal in dat bijzonder geval een constant regelcommando in de tijd afgeven, terwijl de integraal van de constant blijvende deviatie  $e$  een regelcommando voortbrengt die lineair (langs een rechte) zal aangroeien in de tijd.

4. De integratie van de deviatie  $e$  kan in numerieke vorm worden geïmplementeerd m.b.v. de Simpsonregel:

$$I(k) = I(k-2) + [e(k-2) + 4e(k-1) + e(k)]\Delta t/3 \quad (11)$$

De integraal van de deviatie tussen het tijdstip  $k-2$  en het huidig tijdstip  $k$  wordt benaderd door de oppervlakte onder de parabool die de punten  $e(k-2)$ ,  $e(k-1)$  en  $e(k)$  met elkaar verbindt. Die uitkomst wordt vervolgens opgeteld bij de vorige waarde van de integraal op het tijdstip  $k-2$ . De integratieberekening m.b.v. de Simpsonregel kan dus maar na elke twee tijdstappen  $\Delta t$  worden uitgevoerd. De parameter  $\Delta t$  is de bemonsteringstijd ('sampling time') van de digitale regelaar: de digitale regelaar kijkt als het ware om de  $\Delta t$  seconden naar de deviatie en berekent het regelcommando.

Een andere mogelijkheid om de integratie numeriek te implementeren is m.b.v. de trapeziumregel:

$$I(k) = I(k-1) + [e(k-1) + e(k)]\Delta t/2 \quad (12)$$

In deze implementatie wordt de integratieberekening na elke tijdstap  $\Delta t$  uitgevoerd, maar de trapeziumregel is minder accuraat dan de Simpsonregel.

5. De D-regelactie reageert op de snelheid waarmee de deviatie op elk tijdstip verandert. Deze regelactie wordt voornamelijk toegepast in 'trage' processen.

De instelbare parameter  $\tau_d$  wordt de differentiatietijd genoemd. Het is de tijd die de P-regelactie zou nodig hebben om dezelfde waarde van het regelcommando te bereiken als de D-regelactie, zou de deviatie  $e$  vanaf 0 rechtlijnig beginnen toe te nemen in de tijd (de afgeleide van een rechte is een constante, nl. de helling of richtingscoëfficiënt van deze rechte).

6. De afgeleide van de deviatie  $e$  kan in numerieke vorm worden geïmplementeerd m.b.v. een achterwaartse differentiebenadering van de 2de orde:

$$D(k) = \frac{e(k-2) - 4e(k-1) + 3e(k)}{2\Delta t} \quad (13)$$

7. De instelling van de versterkingsfactor, de integratietijd en de differentiatietijd van de PID-regelaar kan worden bepaald uit de stapresponsie of de sinusresponsie van het proces.

De stapresponsie is de verandering van het uitgangssignaal van het proces (de procesgrootte) in de tijd volgend op een stapvormige verandering van het regelcommando of de corrigerende grootte, waarbij eventuele andere ingangssignalen en stoorinvloeden van het proces constant moeten blijven en waarbij de regelkring open is (regelaar op handbediening).

De sinusresponsie is de verandering van het uitgangssignaal van het proces (de procesgrootte) in de tijd wanneer een sinusvormig ingangssignaal aan het proces wordt toegevoerd. In het geval van een lineair proces zal het uitgangssignaal dan eveneens een sinusvormig verloop aannemen met dezelfde frequentie als het ingangssignaal. Er zal echter een amplitude- en een fasehoekverschil zijn waar te nemen tussen de beide signalen. De variaties in amplitude en fasehoek voor verschillende frequenties van het sinusvormig ingangssignaal worden veroorzaakt door het proces. Deze variaties i.f.v. de frequentie (de zgn. 'frequentieresponsie van het proces') worden dan in een Bodediagram voorgesteld.

Uit de stap- of sinusresponsies van een proces kan de statische overdrachtsverhouding van het proces, de tijdconstante(n) en de looptijd van het proces worden afgeleid. Op basis van deze proceskenmerken kunnen dan geschikte regelaarparameters worden bepaald.

#### IV. DE TIJDPROPORTIONELE REGELAAR (PWM-REGELAAR)

1. De tijdproportionele regelaar is feitelijk een PID-regelaar die een binair schakelcommando uitstuurt waarvan de tijdsduur van het 'aan'- en 'uit'-commando op een instelbare vaste cyclustijd is gebaseerd. Het regelcommando  $OUT(\%)$  van de PID-regelaar bepaalt hoeveel procent van de vaste cyclustijd het schakelcommando 'aan' actief is. Het resterend gedeelte van de vaste cyclustijd is het schakelcommando 'uit' actief.

Daarmee functioneert de tijdproportionele regelaar volgens het principe van pulsbreedtemodulatie (PWM). De pulsbreedte van het schakelcommando 'aan' is afhankelijk van de grootte van de deviatie. De deviatie wordt na elke vaste cyclustijd opnieuw geëvalueerd.