

Blok 7

P- en PI-regelaar in een open kring

Doelstellingen:

- De statische karakteristiek en versterkingsfactor van een P-regelaar kunnen uitleggen.
- Verband tussen proportionele band en versterking kunnen afleiden.
- Stapantwoord van P-regelaar zonder en met voorinstelling afleiden.
- Bepaling I-regelaar en stapantwoord in een open kring.
- Integratietijd en integraalvoorstelling van I-regelaar afleiden (facultatief).
- Stapantwoord van een PI-regelaar met parameters bepalen.
- Genormaliseerde formules van PI-regelaar kunnen verklaren (facultatief).

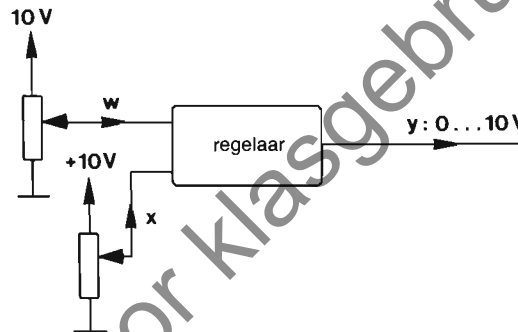


Fig. 7.1 Regelaar in een open kring

In een gestandaardiseerd systeem kunnen we de wenswaarde w en de proceswaarde x simuleren met een spanning tussen 0 ... 10 V.

Daartoe is de regelaar in fig. 7.1 uit de gesloten kring gehaald om hem afzonderlijk uit te testen.

We bespreken van de regelaar de statische karakteristiek en het dynamische stapantwoord.

Met deze karakteristieken zullen we de parameters bepalen die de kracht van de regelaar vertegenwoordigen.

De theorie die hier volgt, is zowel toepasbaar op elektronische als op pneumatische regelaars.

Inhoud:

1. Proportionele regelaar.
2. Procentuele proportionele band.
3. Verband tussen versterking en proportionele band
4. Proportionele regelaar met voorinstelling
5. Stapantwoord bij een P-regelaar
6. Instelknoppen voor de P-regelactie
7. Integrerende regelaar
8. Stapantwoord van een I-regelaar
9. Formules voor de I-regelaar
10. Integratietijd T_i
11. Integraalvoorstelling van de I-regelaar
12. PI-regelaar
13. Maatgetal voor de I-actie in een PI-regelaar
14. Genormaliseerde formules voor de PI-regelaar
15. Samenvatting
16. Opdrachten

1. Proportionele regelaar

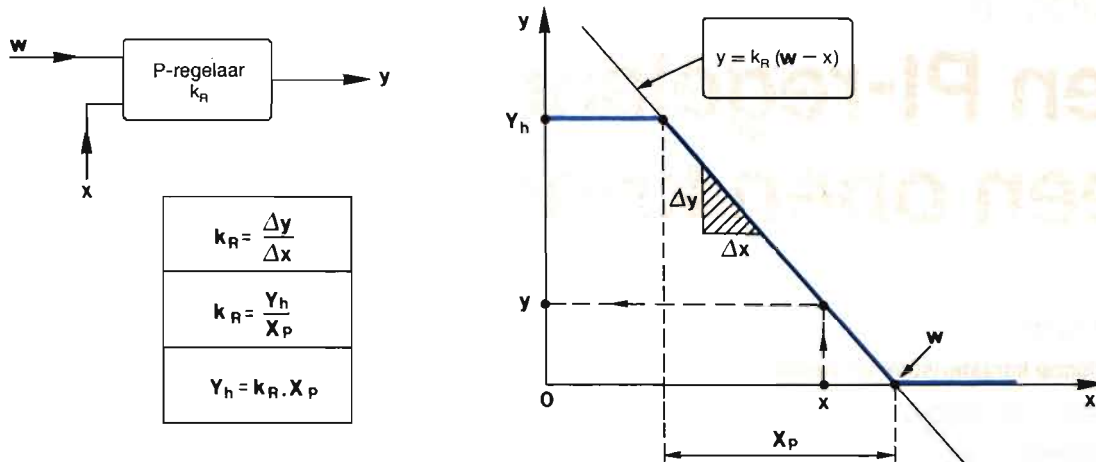


Fig. 7.2 Statische karakteristiek van de P-regelaar

Een regelaar wordt een proportionele regelaar genoemd als de instelwaarde y recht evenredig of proportioneel verloopt met de afwijking $w - x$.

De algemene formule voor een proportionele regelaar luidt:

$$y = k_R (w - x)$$

Hierin is k_R de versterking van de proportionele regelaar of kortweg P-regelaar.

1.1 Statische karakteristiek van de P-regelaar

Bij elke waarde van x hoort een waarde van y volgens de functie:

$$y = k_R (w - x)$$

Tussen y en x bestaat er een lineair verband. De versterking k_R en de gewenste waarde w beschouwen we hierin als constanten.

Als x stijgt dan wordt $w - x$ kleiner, dus y daalt. Wiskundig kan de grafiek negatief worden maar technologisch wordt y begrensd tot $y = 0$ (klep volledig dicht) : $y = 0$ als $x = w$.

Als x daalt dan wordt $w - x$ groter zodat y stijgt. Technologisch wordt y naar boven begrensd tot $y = Y_h$ (klep volledig open). Kijk naar de blauwe lijn.

1.2 Versterking van de P-regelaar

Per definitie is de versterking van de P-regelaar

$$k_R = \frac{\text{verandering van } y}{\text{verandering van } x} = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

Hoe steiler de statische karakteristiek in fig. 7.2, hoe groter k_R en des te krachtiger reageert de P-regelaar.

1.3 Proportionele band X_p

Het gedeelte van de statische karakteristiek waarin y technologisch lineair verloopt met x , noemt men het proportionaliteitsgebied.

De proportionele band X_p is de afstand die x doorlopen moet opdat y over het hele bereik $0 - Y_h$ vermeld wordt.

Voor het hele bereik geldt dus:

$$k_R = \frac{Y_h}{X_p} \quad \text{of:}$$

$$Y_h = k_R \cdot X_p$$

2. Procentuele proportionele band (PB)

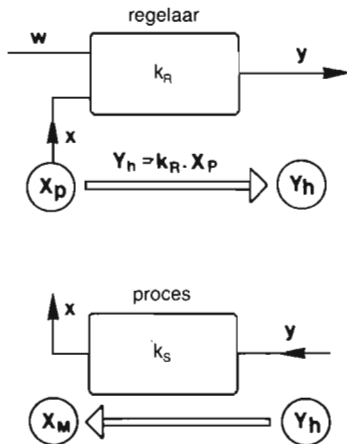


Fig. 7.3 Regelaar en proces afzonderlijk voorgesteld

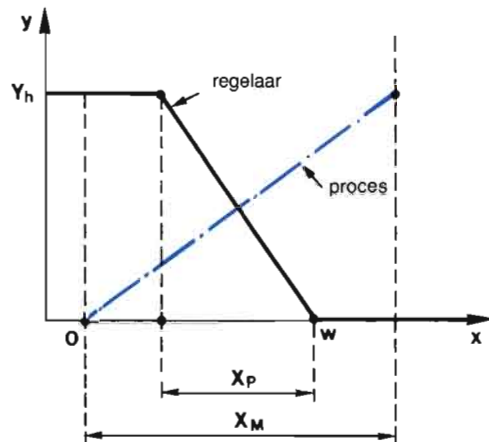


Fig. 7.4 Statische karakteristiek van P-regelaar en proces

Zoals in fig. 7.3 is aangegeven bevat elke regelketen twee afzonderlijke blokken:

- onderaan het proces met een versterking k_s en
- bovenaan de regelaar met een versterking k_R .

In de statische karakteristiek van fig. 7.4 is Y_h de maximum instelwaarde en X_p de proportionele band van de P-regelaar.

Hierbij is: $Y_h = k_R \cdot X_p$ waarin k_R de regelversterking voorstelt.

In dezelfde fig. 7.4 is in punt-streeplijn de geïdealiseerde karakteristiek van een proces weergegeven. Hierin is X_M het meetbereik van het proces of de verandering van de proceswaarde x , als de instelwaarde y over de hele afstand $0 - Y_h$ vermeld wordt.

Vandaar de uitdrukking:

$$X_M = k_s \cdot Y_h \quad \text{waarin } k_s \text{ de procesversterking voorstelt (kijk terug naar blz. 85).}$$

Bij de proportionele band X_p van de regelaar en het meetbereik X_M van het proces behoort dus een volledige klepverstelling Y_h . Hieruit is de gewoonte gegroeid om de proportionele band X_p te bekijken ten opzichte van het meetbereik X_M en dit procentueel uit te drukken. Men koppelt op die manier een eigenschap van de regelaar aan een eigenschap van het proces. Of nog anders: men vergelijkt de gevoeligheid van de regelaar, met deze van het proces.

De procentuele proportionele band, afgekort **PB**, wordt dan:

$$PB = \frac{X_p}{X_M} \cdot 100 \quad \% \quad (1)$$

In formule (1) is: $X_p = \frac{Y_h}{k_R}$ en $X_M = k_s \cdot Y_h$

$$\text{Vandaar: } PB = \frac{Y_h \cdot 100}{k_R \cdot k_s \cdot Y_h} \%$$

$$\text{of} \quad PB = \frac{100}{k_R \cdot k_s} \quad \% \quad (2)$$

Voorbeelden

$PB = 1\%$ betekent een zeer krachtige regelactie. Inderdaad als x over slechts 1% van het meetbereik X_M verandert, dan verandert y over het hele instelbereik Y_h .

$PB = 100\%$ betekent een zwakke regelactie. Inderdaad x moet over 100% van het meetbereik X_M veranderen opdat y over het hele instelbereik Y_h verandert.

3. Verband tussen versterking en proportionele band in standaardsystemen

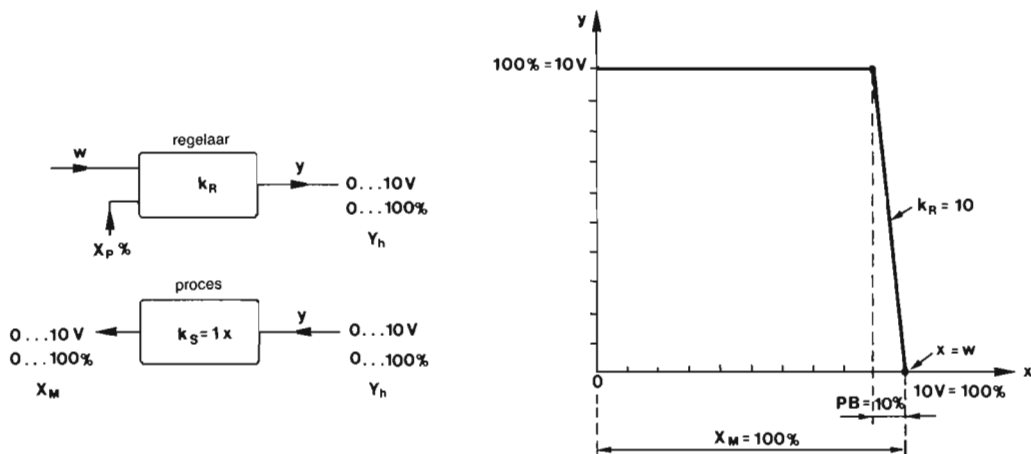


Fig. 7.5 Gestandaardiseerd proces en karakteristiek van P-regelaar

In een gestandaardiseerd proces wordt de versterking van het proces k_s herleid naar 1. Dit gebeurt door de meetzender die het meetbereik X_M van het proces vertaalt naar het standaardsignaal van bijv. 0-10 volt. Dit betekent dat $X_M = 100\%$ zoals in fig. 7.5 is weergegeven.

Een verstelling van de proceswaarde over X_p veroorzaakt via de regelaar 100% klepverstelling. Maar 100% klepverstelling in het proces, veroorzaakt op zijn beurt via het proces een verandering van de proceswaarde over 100%.

De formules voor de proportionele band worden nu sterk vereenvoudigd.

Per definitie is:

$$PB = \frac{X_p}{X_M} \cdot 100 = \frac{X_p}{100} \cdot 100 = X_p$$

$$PB = X_p \quad (1)$$

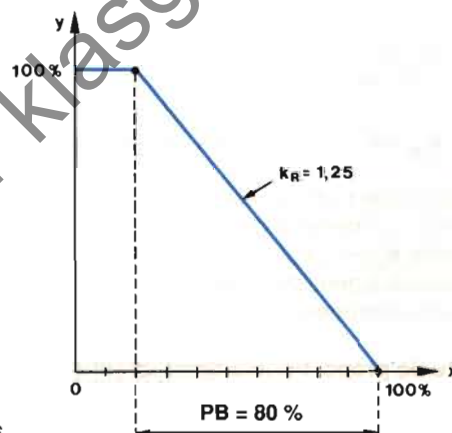
Tevens geldt:

$$PB = \frac{100}{k_R \cdot k_S} \quad \text{waarin } k_S = 1$$

zodat:

$$PB = \frac{100}{k_R} \quad (2)$$

Fig. 7.6



Voorbeelden

$PB = 10\%$ betekent: een verandering van de proceswaarde x over 10% doet de klep over 100% veranderen. De versterking van de regelaar bedraagt 10. Zie fig. 7.5

$PB = 80\%$ betekent: een verandering van de proceswaarde x over 80% doet de instelwaarde over 100% veranderen. De versterking van de regelaar is 1,25. Zie fig. 7.6

$PB = 100\%$ betekent: een verandering van de proceswaarde x over 100% doet de instelwaarde over 100% veranderen. De versterking is 1.

$PB = 500\%$ betekent: een verandering van de proceswaarde x over 500% doet de instelwaarde over 100% veranderen. De versterking is slechts 0,2.

We onthouden:

GROTE VERSTERKING = KLEINE PROPORTIONELE BAND = KRACHTIGE REGELACTIE

KLEINE VERSTERKING = GROTE PROPORTIONELE BAND = ZWAKKE REGELACTIE

④ 4. Proportionele regelaar met voorinstelling

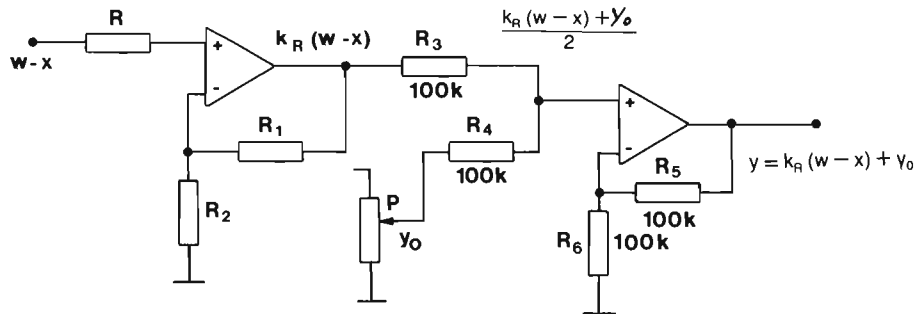


Fig. 7.7 P-regelaar zonder en met voorinstelling

In fig. 7.7 is de eerste trap de P-regelaar met operationele versterker die geschakeld is als niet-inverterende versterker. Bij het bedrag $k_R(w-x)$ kan een constante waarde y_0 worden toegevoegd via de niet-inverterende opteller. Aan de uitgang bekomen we dan $y = k_R(w-x) + y_0$.

Zo kan er voor gezorgd worden dat als $x = w \rightarrow y = y_0$

De waarde y_0 kiest men dan zodanig dat in het proces de te regelen grootheid x gelijk wordt aan de gewenste waarde w .

Voorbeeld

De toevoer van elektrisch vermogen via een TRIAC naar het proces in fig. 7.8 wordt zo gedimensioneerd dat bij een voorinstelling $y_0 = 5$ volt, het vermogen naar het proces 50% is om x gelijk aan w te houden.

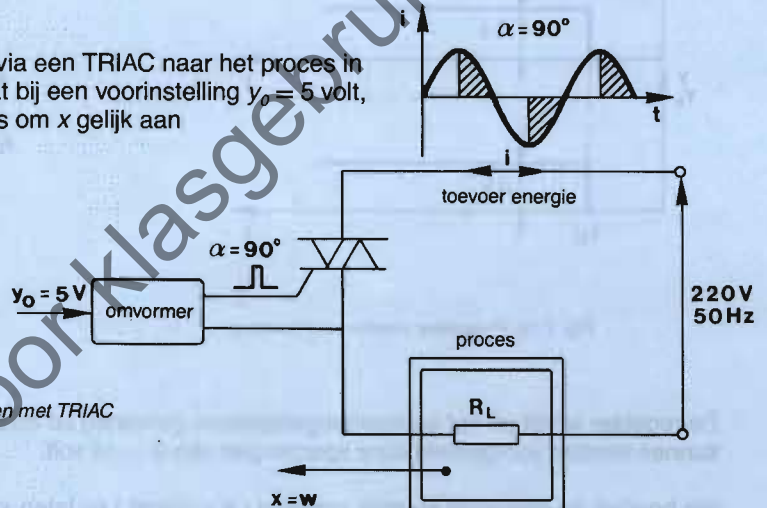


Fig. 7.8 Regeling elektrisch vermogen met TRIAC

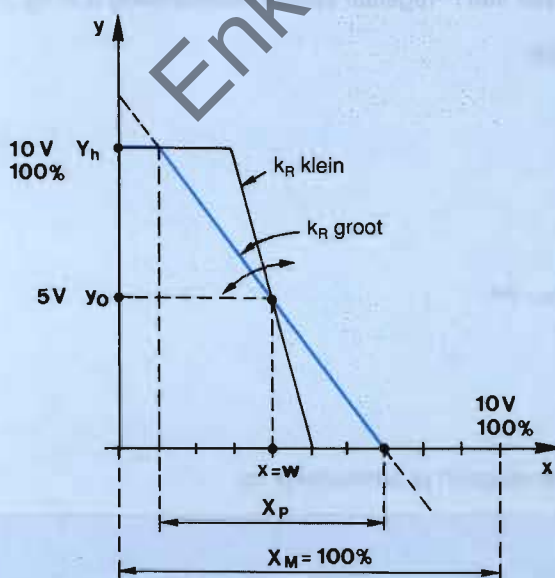


Fig. 7.9 Statistische karakteristiek P-regelaar

De formule van een P-regelaar met voorinstelling luidt:

$$y = k_R(w-x) + y_0$$

Als $x = w$ dan is $w-x = 0$ en $y = y_0$

Men stelt $y_0 = \frac{Y_h}{2}$

In fig. 7.9 is $y_0 = \frac{10\text{ V}}{2} = 5\text{ V}$

Deze 5 volt stuurt de triacmodule waardoor de ontsteekhoek $\alpha = 90^\circ$ is zodat er 50% van het vermogen naar het proces vloeit.

Door een juiste keuze van R_L kan er voor gezorgd worden dat bijvoorbeeld bij $I_{\text{eff}} = 5\text{ A}$ de gelijkheid $x = w$ ontstaat.

Bij veranderen van de versterking k_R , kantelt de statische karakteristiek nu rond het draaipunt $x = w$ en $y = y_0$.

5. Stapantwoord bij een P-regelaar

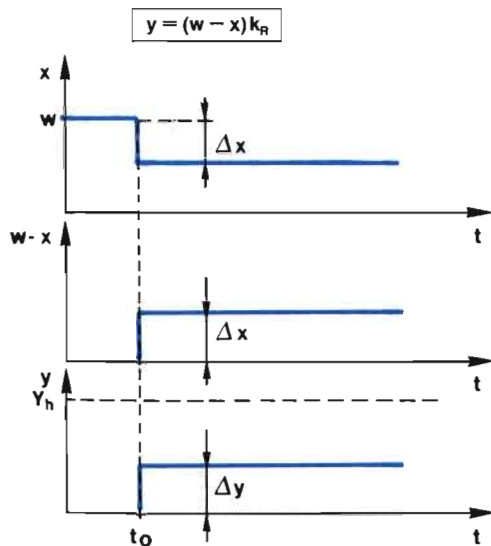
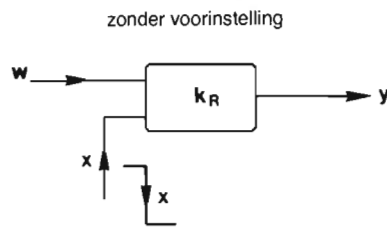


Fig. 7.10 P-regelaar zonder voorinstelling

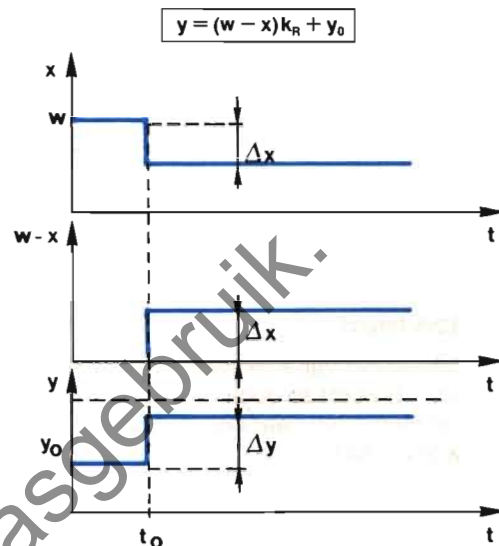
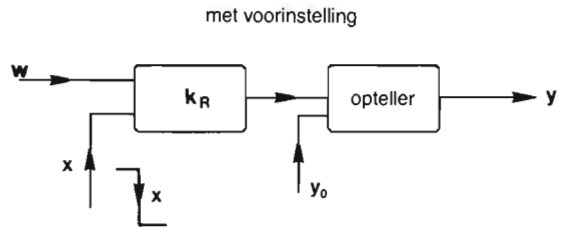


Fig. 7.11 P-regelaar met voorinstelling

De regelaar wordt uit het gesloten regelsysteem genomen en daarna afzonderlijk uitgetest. De signalen w en x kunnen worden voorgesteld door spanningen van 0 ... 10 volt.

We houden de gewenste waarde constant ($w = \text{const.}$) en laten x met een sprong dalen, (of x constant houden en w met een sprong veranderen). Het stapantwoord van een P-regelaar zonder voorinstelling is in fig. 7.10 weergegeven.

Voor de P-regelaar van fig. 7.11 met voorinstelling geldt:

$$y = k_R (w - x) + y_0 \quad (1)$$

Als x met een bedrag Δx vermindert dan is:

$$y + \Delta y = k_R [w - (x - \Delta x)] + y_0$$

$$y + \Delta y = k_R (w - x + \Delta x) + y_0 \quad (2)$$

$$(2) - (1) \Rightarrow y + \Delta y - y = k_R (w - x + \Delta x - w + x) = k_R \cdot \Delta x$$

Vandaar:

$$\Delta y = k_R \cdot \Delta x$$

De correctie Δy is proportioneel met de afwijking Δx en reageert er onmiddellijk op.

Besluit:

De proportionele regelaar is een snelle regelaar die onmiddellijk reageert op een verandering van x . Het nadeel is, dat er steeds een afwijking moet zijn om een correctie te kunnen vormen.

6. Instelknoppen voor de P-regelactie

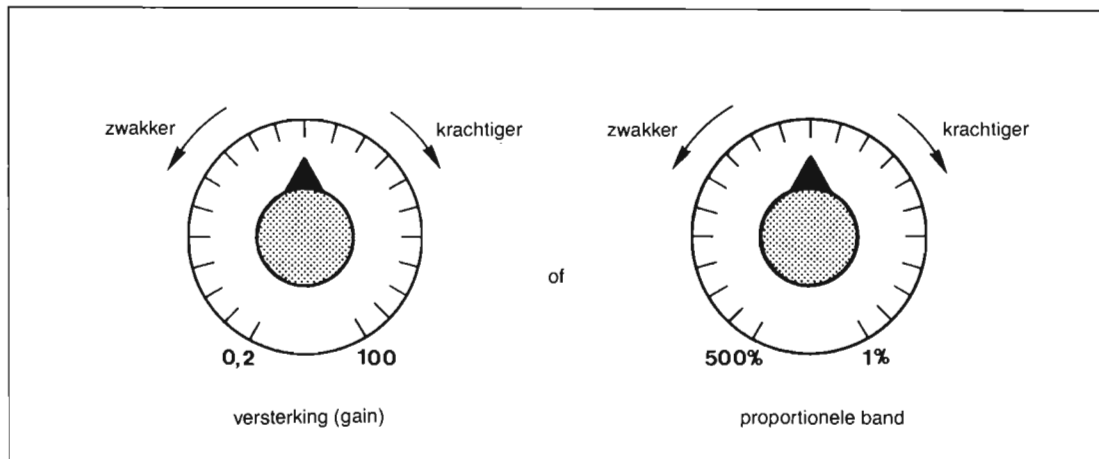


Fig. 7.12 Instelknoppen voor een P-regelaar

De kracht van de P-regelaar wordt bepaald door:

1. de versterkingsfactor k_R ;
Hoe groter de versterkingsfactor, hoe krachtiger de P-actie.
2. de proportionele band PB .
Hoe kleiner de proportionele band, hoe krachtiger de P-actie.

De instelknop die de kracht van de P-regelaar zal bepalen, kan dus op twee manieren geijkt zijn. Er zijn fabrikanten die de versterking gebruiken en anderen passen de proportionele band toe. Zie fig. 7.12.

Het instellen van de P-actie is belangrijk en kritisch zoals we later zullen zien. Een te krachtige actie kan oscillaties veroorzaken, een te zwakke actie zal te traag reageren in de gesloten regelkring.

Vooraleer men aan de instelknop draait, denk altijd eerst na!

1. Is de instelknop geijkt in versterking.
Draaien in de richting van een grotere versterking; betekent de regelactie krachtiger maken.
2. Is de instelknop geijkt in proportionele band.
Draaien in de richting van een kleinere PB ; betekent een krachtiger regelactie.

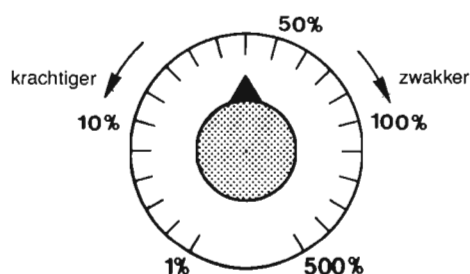


Fig. 7.13 PB-schaal van P-regelaar

Opgepast naar rechts draaien betekent niet altijd een krachtiger regelactie. Als in fig. 7.13 de schaal aanduiding van de PB naar rechts draaiend toeneemt, dan betekent rechts draaien, een verzwakken van de regelactie.

In moderne elektronische regelaars wordt de instelparameter k_R of PB op een digitale display voorgesteld en met druktoetsen gewijzigd.

9. Formules voor de I-regelaar

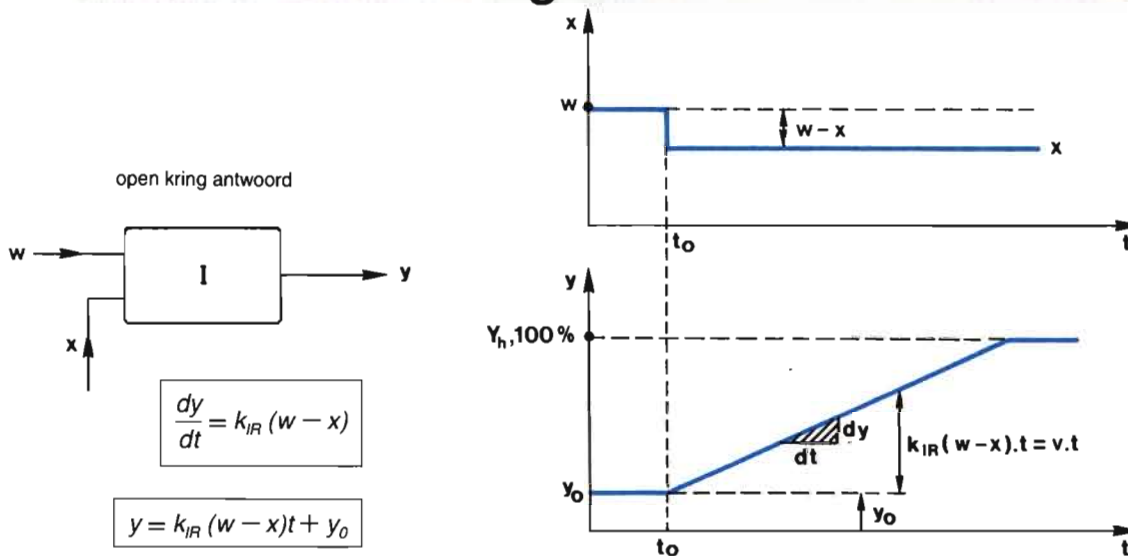


Fig. 7.19 I-regelaar met stapresponsie

1. De snelheid van de instelwaarde y

Als x stapvormig afneemt dan stijgt y lineair zoals in fig. 7.19 is weergegeven. De snelheid v waarmee y verandert is gelijk aan de verandering van y gedeeld door de daarbij horende verandering van de tijd.

Vandaar:

$$v = \frac{dy}{dt}$$

Volgens een voorheen opgestelde definitie moet bij de I-regelaar deze snelheid evenredig zijn met de afwijking $w - x$.

dus:

$$v = \frac{dy}{dt} = k_{IR} (w - x)$$

Hierin is k_{IR} een evenredigheidsconstante die een maat is voor de kracht van de I-actie.

Voorbeeld:

Als $k_{IR} = 2$ en $w - x = 1$ volt dan is $\frac{dy}{dt} = 2$ V/s

Als $k_{IR} = 3$ en $w - x = 1$ volt dan is $\frac{dy}{dt} = 3$ V/s

Als $k_{IR} = 5$ en $w - x = 1$ volt dan is $\frac{dy}{dt} = 5$ V/s

2. De instelwaarde y in functie van de tijd

Als $w - x$ constant blijft dan moet y veranderen met een constante snelheid. Die instelwaarde y verandert volgens een rechte met constante helling. Dit verloop gebeurt volgens een functie:

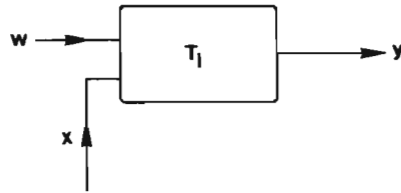
$$y = v \cdot t + y_0$$

Nu is: $v = k_{IR} (w - x)$ of de snelheid van de beweging.

Vandaar: $y = k_{IR} (w - x) \cdot t + y_0$

Hierin is y_0 de instelwaarde die door de I-regelaar constant gehouden wordt als $w - x = 0$. Deze waarde kan in principe gelijk welk bedrag zijn tussen 0 en Y_h .

10. Integratietijd T_i



$$T_i = \frac{Y_h}{k_{IR} \cdot X_M}$$

gestandaardiseerd

$$Y_h = 100\% = X_M$$

$$T_i = \frac{1}{k_{IR}}$$

Zoals reeds aangehaald is de constante k_{IR} maatgevend voor de kracht van de regelactie. Inderdaad k_{IR} bepaalt het verband tussen de afwijking $w - x$ en de snelheid van de regelactie.

$$\frac{dy}{dt} = k_{IR} (w - x)$$

en $y = k_{IR} (w - x) \cdot t + y_0$

- Is k_{IR} groot $\Rightarrow$ krachtige I-actie
- Is k_{IR} klein $\Rightarrow$ zwakke I-actie

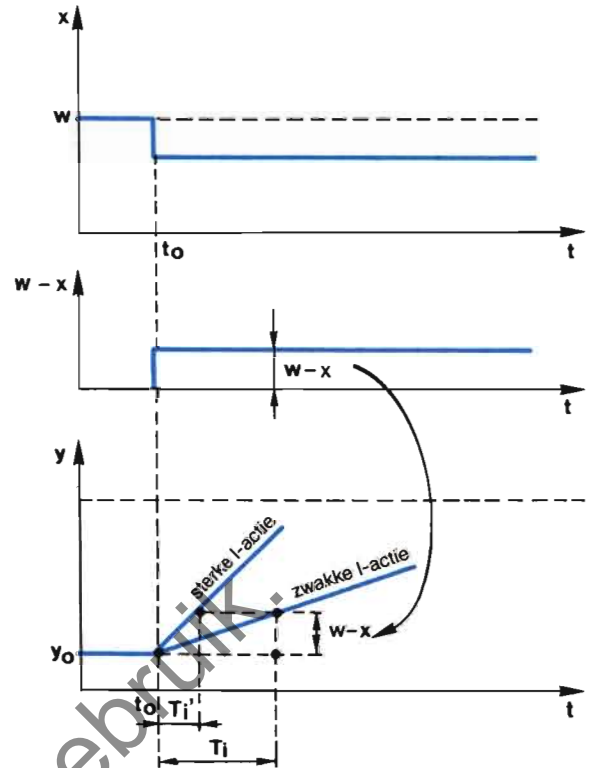


Fig. 7.20 Aanduiding van integratietijd van I-regelaar

1. Definitie van integratietijd T_i

Als maatgetal voor de kracht van de I-regelaar wordt echter meer gebruik gemaakt van een tijd, integratietijd T_i genoemd.

T_i : de integratietijd is de tijd nodig opdat de instelwaarde y het volledig bereik $0 - Y_h$ doorloopt als $w - x = X_M$.

Hierin is X_M is het meetbereik van het proces.

Uit de uitdrukking $y = k_{IR} (w - x) \cdot t$ met $y_0 = 0$ volgt:

$$Y_h = k_{IR} \cdot X_M \cdot T_i$$

en:
$$T_i = \frac{Y_h}{k_{IR} \cdot X_M}$$

2. Gestandaardiseerd systeem

In een gestandaardiseerd systeem geldt: $Y_h = X_M = 100\%$ zodat:

$$T_i = \frac{1}{k_{IR}}$$

Nu is $y = k_{IR} (w - x) \cdot t$. Stelt men hierin $t = T_i$ dan is: $y = k_{IR} (w - x) \frac{1}{k_{IR}} = w - x$

Men kan T_i nu ook als volgt definiëren:

T_i is de tijd nodig opdat y de afstand zou doorlopen gelijk aan $w - x$. Dit is in fig. 7.20 weergegeven.

- Is T_i groot $\Rightarrow$ zwakke I-actie.
- Is T_i klein $\Rightarrow$ sterke I-actie.

11. Integraalvoorstelling van de I-regelaar

F

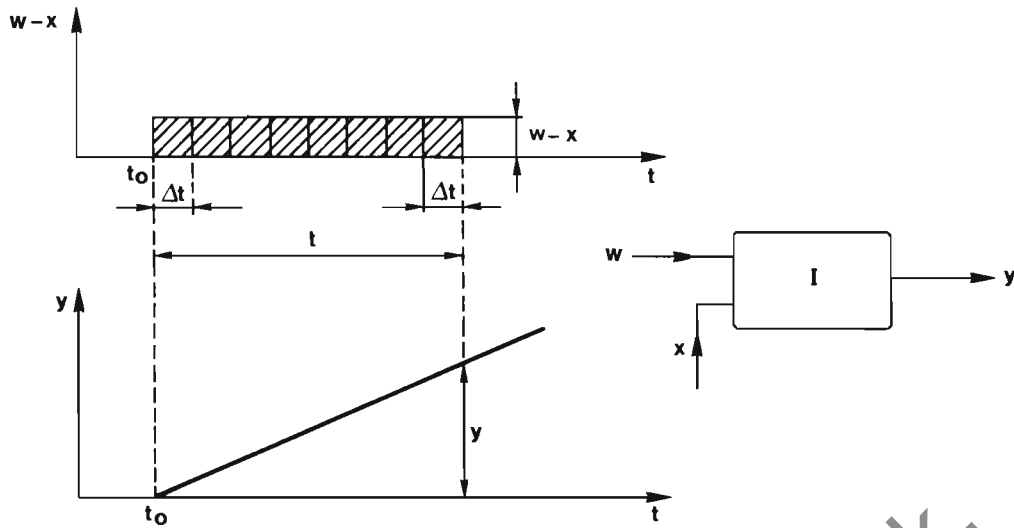


Fig. 7.21 Is $w - x$ constant dan neemt y lineair toe bij I-regelaar

De I-actie is eveneens voor te stellen door een wiskundige formule die in de hogere wiskunde gekend is onder de benaming "integraal" functie. Zie hier een beknopte bespreking voor diegenen die hiervoor belangstelling hebben.

Hernemen we het stapantwoord van de I-regelaar met $y_0 = 0$

$$y = k_{IR} (w - x)t \quad (1)$$

In fig. 7.21 wordt het product $(w - x)t$ voorgesteld door het gearceerd oppervlak gelegen tussen 0 en t . We kunnen dus schrijven:

$$y = k_{IR} \times \text{gearceerd oppervlak}$$

Vervolgens verdelen we de tijd van 0 tot t in kleine stukjes Δt . Hierdoor wordt eveneens het totale oppervlak in kleine oppervlakken verdeeld. We kunnen y nu als volgt schrijven:

$$y = k_{IR} \times \text{de som van de oppervlakken } (w - x) \cdot \Delta t, \text{ tussen de grenzen 0 en } t.$$

$$\text{Dit wordt afgekort: } y = k_{IR} \sum_{0}^t (w - x) \Delta t \quad (2)$$

Neemt men nu voor Δt zeer kleine stukjes dan wordt Δt door dt voorgesteld en de uitdrukking (2) wordt dan als volgt geschreven:

$$y = k_{IR} \int_0^t (w - x) dt \quad (3)$$

Uitdrukking (3) is de integraalvoorstelling van de I-regelaar. Vandaar de benaming voor deze regelactie.

Men leest: De instelwaarde y is evenredig met de integraal van de afwijking $w - x$. De afwijking $w - x$ kan in principe volgens een willekeurige functie veranderen.

Dit is de meest algemene formulevoorstelling van de I-regelaar

Is $w - x$ een constante zoals in fig. 7.21 dan zal het oppervlak lineair met de tijd toenemen zodat de formule overgaat in:

$$y = k_{IR} (w - x)t + y_0$$

Hierin is y_0 = beginwaarde als $t = 0$

12. PI-regelaar

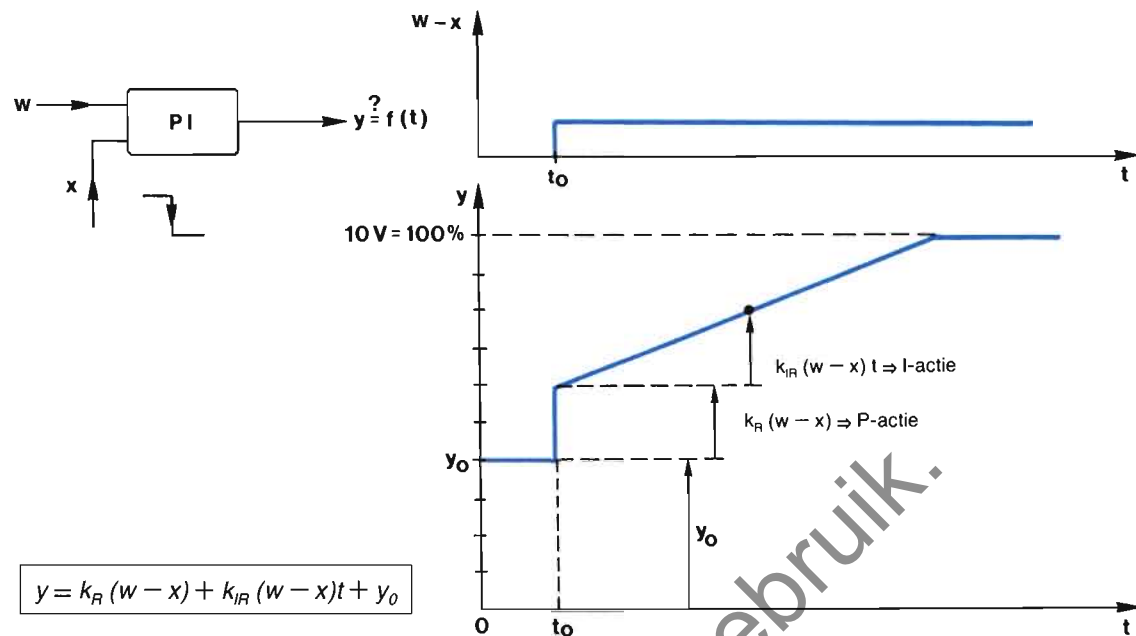


Fig. 7.22 Stapantwoord van een PI-regelaar

In fig. 7.22 beschrijven we de werking van een PI-regelaar in open kring. Op $t = t_0$ laten we de ingang $w - x$ met een sprong veranderen.

1. Bepaling

Een regelaar wordt PI-regelaar genoemd als hij zo gemaakt wordt dat de stapresponsie de som bevat van een P-actie en een I-actie. Het verloop in functie van de tijd wordt als volgt geschreven:

$$y = k_R (w - x) + k_{IR} (w - x)t + y_0$$

De stapresponsie zien we in fig. 7.22. De uitgang y bevat zowel het aandeel van de P- als van de I-actie.

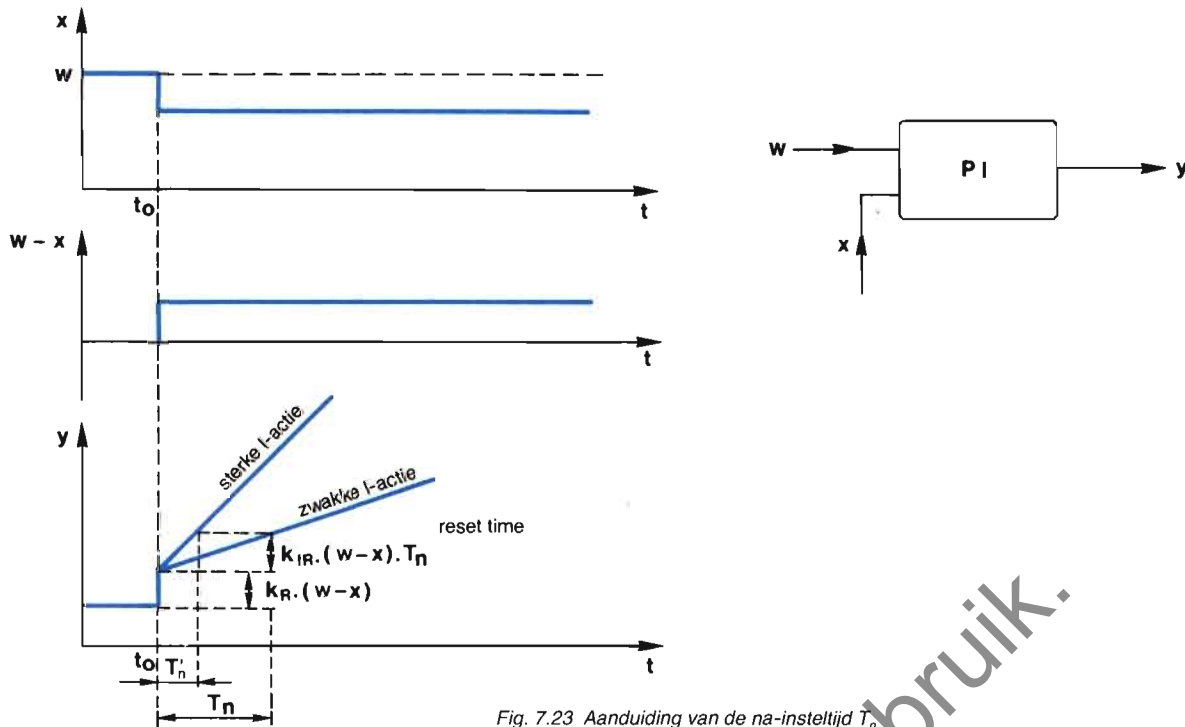
2. We onthouden:

1. De P-regelaar reageert onmiddellijk met een correctie $k_R (w - x)$.
2. Daarna reageert de I-regelaar met een snelheid evenredig met de afwijking: $v = k_{IR} (w - x)$
zodat: $y = v \cdot t = k_{IR} (w - x)t$
3. Als $x = w$ dan staat de uitgang in rust op een voorgaande waarde y_0 .
Deze waarde wordt aan de uitgang vastgehouden door de I-regelaar.

4. In een gesloten regelkring zal bij een afwijking van x t.o.v. w , de P-regelaar snel reageren, zodat de afwijking niet te groot kan worden.
De I-regelaar zorgt dan nadien dat de afwijking tot nul herleid wordt. Het is om deze reden dat de I-regelaar wordt toegevoegd aan de P-regelaar.

Hoe de PI-regelaar gerealiseerd wordt, wordt uitvoerig beschreven in het Practicumboek en in de uitgave "Regeltechniek-Procestechnieken".

13. Maatgetal voor de I-actie in een PI-regelaar

Fig. 7.23 Aanduiding van de na-insteltijd T_n

Om de kracht van de I-actie in een PI-regelaar weer te geven maakt men gebruik van twee maatgetallen.

1. Na-insteltijd T_n

De na-insteltijd is de tijd die de I-regelaar nodig heeft om dezelfde waarde in te stellen als de P-regelaar. Het is dus de tijd die de PI-regelaar nodig heeft om de P-actie te verdubbelen.

Hoe kleiner T_n , hoe sneller de I-actie of des te krachtiger is de I-actie.
Hoe groter T_n , hoe trager de I-actie of des te zwakker is de I-actie.

Men moet zich ook goed realiseren dat deze na-insteltijd T_n (reset time) gekoppeld is aan de versterking van de P-regelaar. Men vergelijkt eigenlijk de kracht van de I-actie met deze van de P-actie.

2. Herhalingsfactor of reset rate r

De herhalingsfactor is het aantal keren dat de I-regelaar de actie van de P-regelaar herhaalt per minuut. (repeats per minute)

In fig. 7.24 is de herhalingsfactor r gelijk aan 3.

Hoe groter r , des te krachtiger is de I-actie.
Hoe kleiner r , des te zwakker is de I-actie.

3. Verband tussen r en T_n

Gedurende T_n minuten herhaalt de I-regelaar de P-actie 1 x;

in 1 minuut herhaalt de I-regelaar de P-actie $\frac{1}{T_n}$ x

Vandaar:
$$r = \frac{1}{T_n}$$

Voorbeeld

In fig. 7.24 is $r = 3 \text{ rep/min}$ of $T_n = \frac{1}{3} \text{ min} = 20 \text{ s}$

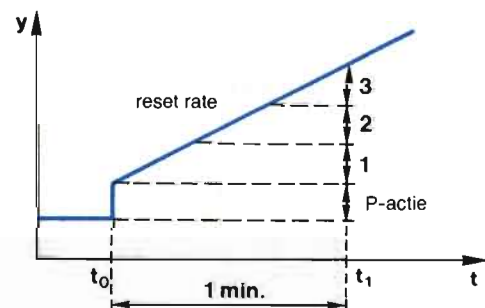


Fig. 7.24

14. Genormaliseerde formules voor de PI-regelaar

1. T_n , k_R en k_{IR}

Wordt na een stap sprong het I-aandeel gelijk aan het P-aandeel dan kan men schrijven:

$$\boxed{k_R (w - x) = k_{IR} (w - x) T_n} \quad t = T_n$$

$\uparrow$ $\uparrow$
 P-actie I-actie

Vandaar:

$$\boxed{T_n = \frac{k_R}{k_{IR}}} \quad \text{en} \quad \boxed{r = \frac{1}{T_n} = \frac{k_{IR}}{k_R}}$$

2. Algemene formule van de PI-regelaar

De algemene formule voor de PI-regelaar kan geschreven worden in de vorm van een integraal

$$\boxed{y = k_R (w - x) + k_{IR} \int_0^t (w - x) dt}$$

Brengen we k_R buiten haken:

$$y = k_R \left[(w - x) + \frac{k_{IR}}{k_R} \int_0^t (w - x) dt \right]$$

Vervangen we $\frac{k_{IR}}{k_R}$ door $\frac{1}{T_n}$ dan wordt:

$$\boxed{y = k_R \left[(w - x) + \frac{1}{T_n} \int_0^t (w - x) dt \right]}$$

Deze laatste formule wordt de genormaliseerde algemene formule van de PI-regelaar genoemd. De elektronische schakeling van de PI-regelaar moet zo ontworpen worden, dat de uitgang y verloopt volgens deze uitdrukking.

3. Formule voor het stapantwoord

De volgende formule is enkel geschikt voor het stapantwoord terwijl de algemene formule voor alle signaaltvormen geldig is.

De formule voor het stapantwoord:

$$y = k_R (w - x) + k_{IR} (w - x) t + y_0$$

We plaatsen k_R buiten haken:

$$y = k_R \left[(w - x) + \frac{k_{IR}}{k_R} (w - x) t \right] + y_0$$

We vervangen $\frac{k_{IR}}{k_R}$ door $\frac{1}{T_n}$:

$$y = k_R \left[(w - x) + \frac{1}{T_n} (w - x) t \right] + y_0$$

Vandaar:

$$\boxed{y = k_R (w - x) \cdot \left(1 + \frac{1}{T_n} \cdot t \right) + y_0}$$

Dit is de genormaliseerde formule voor het stapantwoord. De elektronische schakelingen met operationele versterkers (OA's) worden zo ontworpen dat het stapantwoord volgens deze functie verloopt.

15. Samenvatting

1. Formules van de P-regelaar:

- $y = k_R (w - x)$ $k_R = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \text{regelversterking}$

- Proportionele band X_p

$$Y_h = k_R \cdot X_p$$

- Procentuele proportionele band (PB of X_p %)

$$PB = \frac{X_p}{X_M} \cdot 100 = \frac{100}{k_R \cdot k_S} \text{ in \%}$$

- met voorinstelling

$$y = k_R (w - x) + y_0$$

2. Formules van de I-regelaar:

- $y = k_{IR} (w - x) \cdot t + y_0$ stapresponsie als $w - x$ constant is

- integratietijd $T_i = \frac{1}{k_{IR}}$

- $y = k_{IR} \int_0^t (w - x) dt$

3. Formules PI-regelaar:

- $y = k_R (w - x) + k_{IR} (w - x)t + y_0$ voor stapresponsie

- na-insteltijd: $T_n = \frac{k_R}{k_{IR}}$

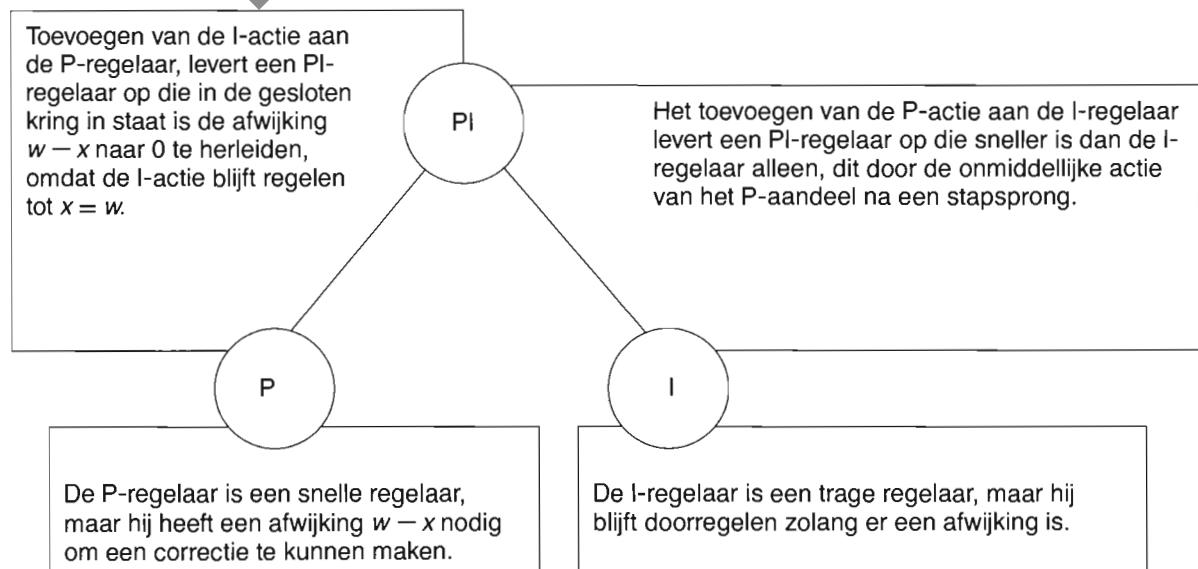
- herhalingsfactor: $r = \frac{1}{T_n}$

- $y = \left[(w - x) + \frac{1}{T_n} \int_0^t (w - x) dt \right]$

4. We onthouden:

Hoe groter k_R des te krachtiger de P-actie
Hoe kleiner X_p des te krachtiger de P-actie
Hoe kleiner T_n des te krachtiger is de I-actie
Hoe groter r des te krachtiger is de I-actie

5. Vergelijking regelacties:



16. Opdrachten

1. Geef van de proportionele regelaar zonder voorinstelling :

1. de formule ;
2. de statische karakteristiek ;
3. de proportionele band ;
4. de formule als $w - x = X_p$.

2. Procentuele proportionele band ($X_p \% = PB$)

1. Geef de formule voor de regelaar als $w - x = X_p$. $Y_h = \dots\dots\dots$
2. Geef de formule voor het proces als $y = Y_h$. $X_M = \dots\dots\dots$
3. Definieer de procentueel proportionele band.
4. Leid een tweede formule af, voor de procentuele proportionele band.
5. Interpreteer in woorden aan de hand van de twee formules :
 $PB = 1\%$
 $PB = 100\%$

3. Teken het schema van de proportionele regelaar met voorinstelling :

1. Geef de formule voor y .
2. Teken de statische karakteristiek.
3. Definieer de proportionele band.
4. Hoe wordt y_0 ingesteld ?

4. Teken het stapantwoord van een proportionele regelaar.

1. Geef de formule voor Δy .
2. Typeer de proportionele regelaar in woorden en geef ook het nadeel van de proportionele regelaar.

5. Invuloefening :

De formule voor de proportionele regelaar $y = \dots\dots\dots$

De proportionele band X_p is de variatie van x waarvoor $y \dots\dots\dots$

Een kleine versterking k_R van de regelaar komt overeen met een $\dots\dots\dots$ proportionele band.

Een $\dots\dots\dots$ versterking k_R komt overeen met een kleine proportionele band.

$PB = 1\%$ betekent een $\dots\dots\dots$ regelactie.

$PB = 100\%$ betekent een $\dots\dots\dots$ regelactie.

$PB = 1\%$ betekent dat y over het hele bereik verandert als $\dots\dots\dots$

$PB = 100\%$ betekent dat y over het hele bereik verandert als $\dots\dots\dots$

$PB = 1\%$ betekent dat de versterking van de regelaar gelijk is aan :

$k_R = \dots\dots\dots$

$PB = 100\%$ betekent dat de versterking van de regelaar gelijk is aan :

$k_R = \dots\dots\dots$

6. Geef van de integrerende regelaar:

1. de algemene formule voor de uitgang y :
2. de formule voor het tijdsantwoord als $w - x$ een sprong is,
3. de formule voor de snelheid van de instelwaarde y ,

Wat doet y als:

1. $x = w$
2. $x < w$
3. $x > w$

Hoe is de snelheid van y als:

1. $w - x$ groot is
2. $w - x$ klein is
3. $w - x = 0$

7. Geef het stapantwoord van de I-regelaar:

1. als x met een bedrag Δx daalt onder w ;
2. als x met een bedrag Δx stijgt boven w ;
3. als $w - x$ volgens fig. 7.25 verandert.

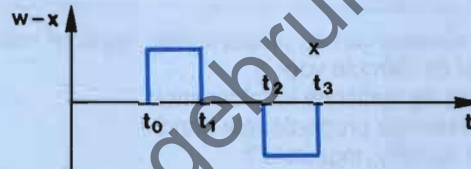


Fig. 7.25

8. Invuloefening:

Ten opzichte van de P-regelaar is een I-regelaar een regelaar.

Hoe groter de afwijking des te reageert de I-regelaar.

In een gesloten kring zal de afwijking tot herleid worden.

De uitgang y blijft dan en houdt in het proces $x =$

9. Geef van de PI-regelaar:

1. de algemene formule voor de uitgang y ;
2. de formule voor het tijdsantwoord als $w - x$ een sprong is;
3. de grafiek $y = f(t)$ als $w - x$ een sprong is;
4. de bepaling van de na-insteltijd T_n (ook aanduiden op de grafiek) en van de reset rate.

10. Invuloefening.

Als $w - x$ een sprong is, dan reageert een PI-regelaar op een specifieke wijze.

De P-regelaar reageert onmiddellijk met een bedrag Daarna reageert de I-regelaar met een snelheid evenredig met

Als $w = x$, dan houdt de I-regelaar de y -waarde

T_n is de tijd waarin de I-regelaar

Hoe kleiner T_n des te is de I-actie.

Het toevoegen van een P-actie aan een I-actie vormt een PI-regelaar die is dan een

I-regelaar. Het toevoegen van een I-actie aan een P-regelaar levert een PI-regelaar op die de tot nul herleidt.

11. 1. Als het I-aandeel gelijk geworden is aan het P-aandeel bij een PI-regelaar ($w - x$ is een stapsgang), dan is:

$$k_R (w - x) = \dots\dots\dots$$

waaruit: $T_n = \dots\dots\dots$

2. Schrijf de formule voor $y = f(t)$ bij een stapsgang, in de genormaliseerde vorm.

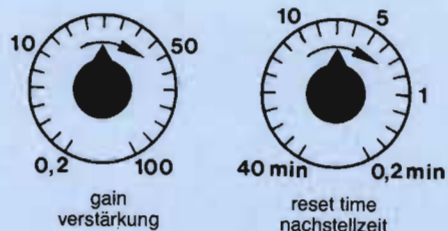
3. De bedieningsknop voor de instelling van T_n is geijkt in $\dots\dots\dots$ of $\dots\dots\dots$

Men noemt $r = \frac{1}{T_n} \dots\dots\dots$; de eenheid is: $\dots\dots\dots$

4. Als $r = 5$ dan zal de I-actie $\dots\dots\dots$ de P-actie $\dots\dots\dots$ per minuut, de na-insteltijd T_n is dan: $\dots\dots\dots$ min.

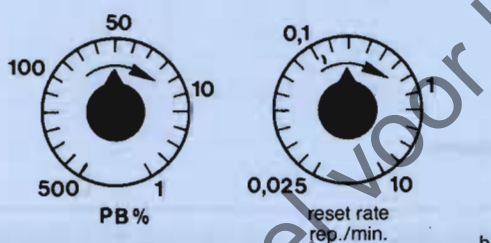
Hoe groter r , des te $\dots\dots\dots$ is de I-actie

12. Vul in fig. 7.26 de figuren aan met "wordt krachtiger" of "wordt zwakker" als de knoppen naar rechts verdraaid worden.



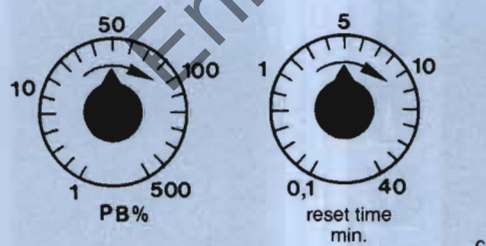
P-actie: $\dots\dots\dots$

I-actie: $\dots\dots\dots$



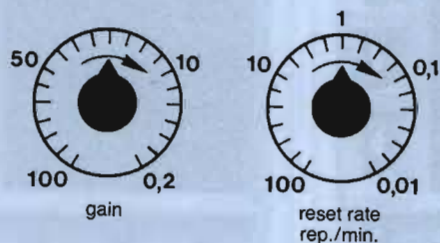
P-actie: $\dots\dots\dots$

I-actie: $\dots\dots\dots$



P-actie: $\dots\dots\dots$

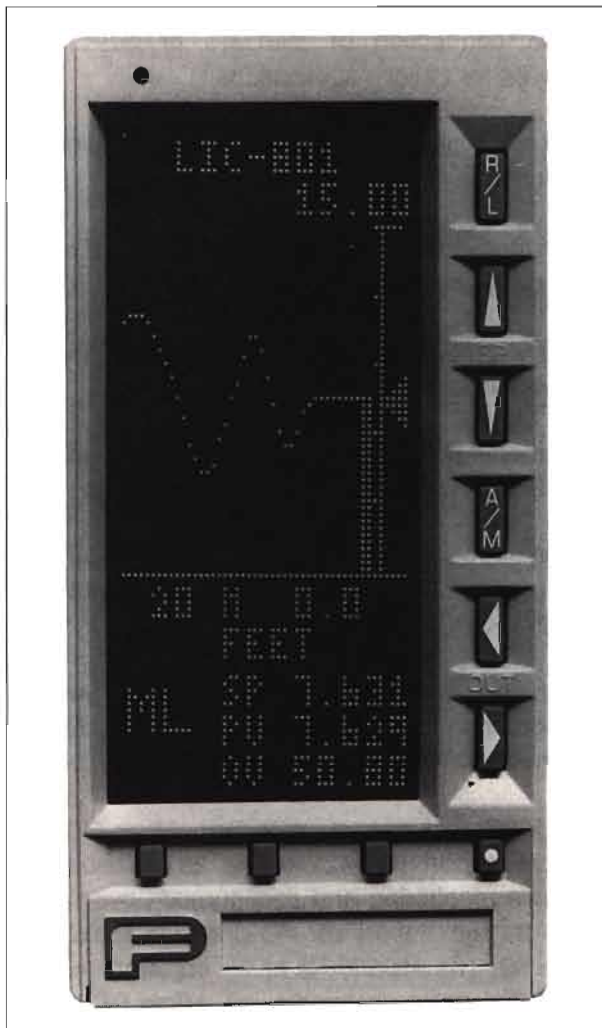
I-actie: $\dots\dots\dots$



P-actie: $\dots\dots\dots$

I-actie: $\dots\dots\dots$

Fig. 7.26



A

In fig. 7.27 zien we het frontpaneel van een digitaal opgebouwde regelaar van Fischer-Porter. Het matrix scherm laat toe allerlei gegevens over de gesloten kring op te vragen zoals dit ook op het scherm van een computer kan gebeuren.

In A zien we een slingerende beweging van de proceswaarde.

B toont ons de proceswaarden x (verticaal) en de instelwaarde y (horizontaal) van twee regelkringen.

In C zien we de waarde-aanduiding van de proportionele band en de na-insteltijd (reset time) (100% en 0/099...).

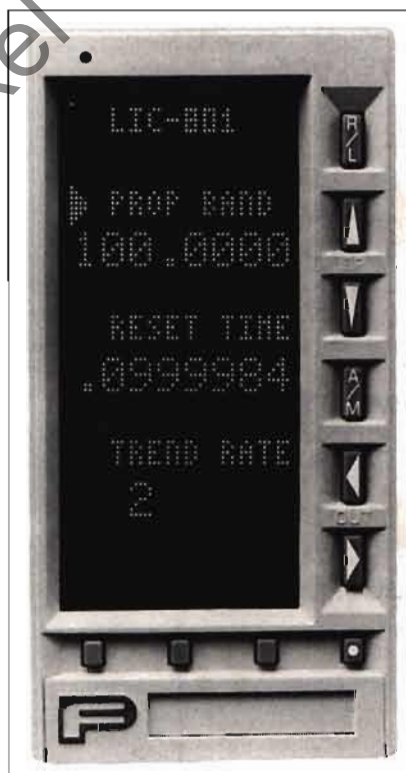
In D toont het display de schematische voorstelling van een procesketen.

Fig. 7.27: Moderne regelaar van Fischer-Porter met matrix scherm op het frontpaneel.

B



C



D

