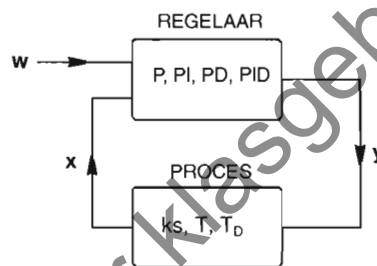


Blok 9

Regelaar en proces in gesloten regelkring

Doelstellingen:

- Het begrip "statische instelling" van regelaar en proces grafisch verklaren.
- De invloed van de kringversterking in gesloten regelkring bepalen.
- De wederzijdse invloed van regelaar en proces uitleggen.
- Interpretatie van stapantwoorden van de verschillende regelaars.
- Duidelijk onderscheid maken tussen de invloed van de P-, I- en D-actie in een gesloten kring.



Regelaar en proces in gesloten kring

De regelaar moet de proceswaarde x gelijk houden aan de gewenste waarde w .

We hebben echter de keuze tussen verschillende typen van regelaars. Zo zijn er de P-, PI-, PD- en PID-regelaars.

Welke invloed hebben deze regelaars in de gesloten kring met het proces?

We bestuderen hier de verschijnselen die zich voordoen in de gesloten kring eerst met de P-regelaar, dan de PI, de PD- en tenslotte de PID-regelaar.

We maken voorlopig geen onderscheid tussen de verschillende soorten processen.

We moeten goed in staat zijn onderscheid te maken tussen de invloeden van de verschillende regelaars in de gesloten kring. Pas dan kan men met inzicht de regelaar aanpassen aan het proces.

Inhoud:

1. Statische instelling van P-regelaar en proces
2. Berekening van de statische afwijking
3. Dynamische responsies van regelaar-proces
4. Wisselwerking van proces en regelaar
5. Startresponsie van P-regelaar en proces
6. P-regelaar en proces: verstellen van gewenste waarde
7. P-regelaar en proces: storingsantwoord
8. I-regelaar en proces: verstellen van gewenste waarde
9. I-regelaar en proces: storingsantwoord
10. PI-regelaar en proces: verstellen van gewenste waarde
11. PI-regelaar en proces: storingsantwoord
12. PD-regelaar en proces: storingsantwoord
13. PID-regelaar en proces: storingsantwoord
14. Praktisch meten van dynamische responsie
15. Effect van instelknoppen in de gesloten kring
16. Opdrachten

1. Statische instelling P-regelaar en proces

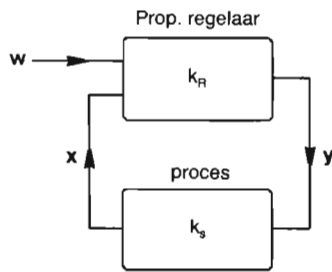


Fig. 9.1 Temperatuurregeling

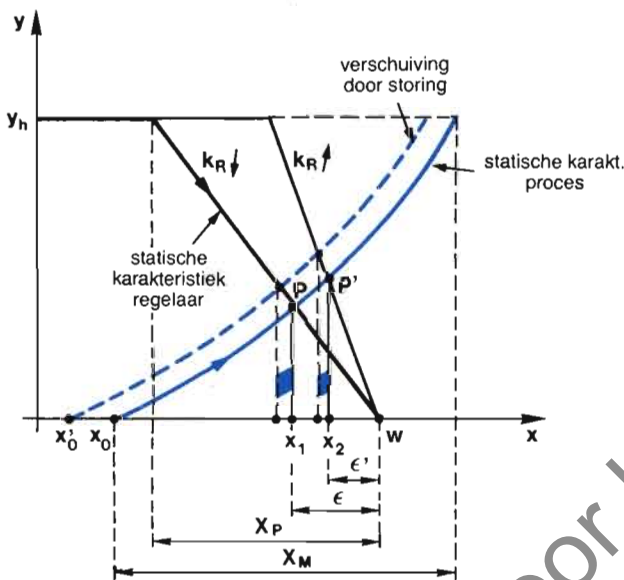


Fig. 9.2 Karakteristieken van regelaar en proces

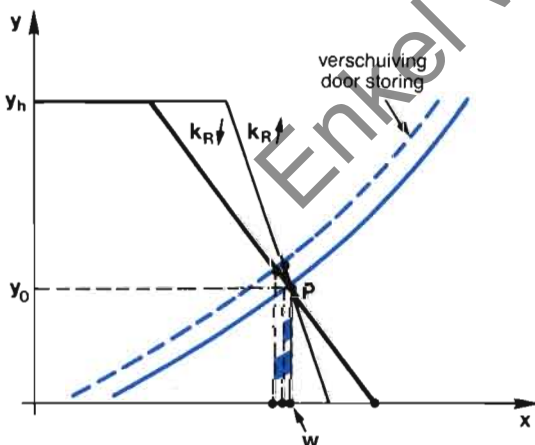


Fig. 9.3 Instelpunt met voorinstelling

Beschouw in fig. 9.1 het blokschema van een temperatuurregeling van een hoeveelheid vloeistof. Als regelaar en proces aan elkaar gesloten worden op het ogenblik dat $x = x_0$ (omgevingstemperatuur) en $y = Y_h$, dan zal x stijgen. Komt x in de proportionele band van de regelaar, dan zal y beginnen te dalen zoals in fig. 9.2 is voorgesteld. De uiteindelijke instelling x , y moet zowel op de statische karakteristiek van de regelaar liggen als op de statische karakteristiek van het proces. Dit kan alleen in het snijpunt P, waardoor de x -waarde zich instelt op x_1 , met een blijvende afwijking ϵ t.o.v. w .

Is de versterking van de regelaar groter, dus de proportionele band kleiner, dan vormt zich het instelpunt in P'. De x -waarde wordt nu x_2 , dus de afwijking ϵ' is kleiner dan ϵ .

Treedt er een storing op, bijv. een daling van de omgevingstemperatuur, dan betekent dit een verschuiving van de statische karakteristiek van het proces (stippellijn). Er ontstaat een nieuwe afwijking t.o.v. x_1 en x_2 . We zien duidelijk: hoe groter k_R ,
 — des te kleiner is de afwijking ϵ ten opzichte van w
 — des te kleiner zijn ook de veranderingen t.o.v. de instelpunten (blauw gemerkt)

Hebben we te doen met een regelaar met voorinstelling, dan is y_0 zo ingesteld dat voor y_0 de instelling x de gewenste waarde w vormt. In fig. 9.3 is er in het instelpunt P geen statische afwijking ϵ .

Bij een verschuiving van de statische karakteristiek is de blijvende afwijking het kleinst bij een hoge versterking k_R . Men zou nu kunnen besluiten om dan maar een heel hoge versterking te gebruiken. Verder zullen we echter zien dat een te hoge versterking het dynamisch gedrag ongunstig beïnvloedt.

Besluit:

een hoge k_R , of kleine X_P , veroorzaakt een kleine blijvende afwijking ϵ ;
 een kleine k_R , of grote X_P , veroorzaakt een grote blijvende afwijking.

2. Berekening statische afwijking van P-regelaar

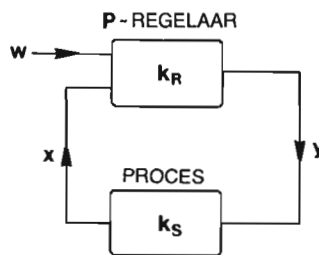


Fig. 9.4 Blokschema temperatuurregeling

We beschouwen in fig. 9.4 het blokschema van een P-regelaar en een verwarmingsproces. Het gedrag van de twee blokken kan door de volgende uitdrukkingen worden omschreven:

$$\text{P-regelaar: } y = k_R (w - x) \quad (1) \text{ regelaar zonder voorinstelling}$$

$$\text{proces: } x = k_S y + x_0 \quad (2) \text{ (geïdealiseerd)}$$

2.1 De rustinstelling x, y

De bedoeling is, x te schrijven in functie van k_R , k_S en w .

We brengen de y -waarde van formule (1) in formule (2):

$$x = k_S \cdot k_R (w - x) + x_0$$

$$x = k_S k_R w - k_S \cdot k_R x + x_0$$

$$x + k_S \cdot k_R x = w \cdot k_R k_S + x_0$$

$$x (1 + k_S \cdot k_R) = w \cdot k_R \cdot k_S + x_0$$

Vandaar:

$$x = w \cdot \frac{k_R \cdot k_S}{1 + k_R \cdot k_S} + x_0 \frac{1}{1 + k_R \cdot k_S}$$

Hierin wordt $k_R \cdot k_S$ de kringversterking van de gesloten regelkring genoemd.

Besluit: hoe groter $k_R \cdot k_S$ des te dichter zal x de gewenste waarde w benaderen en des te kleiner is de statische afwijking.

2.2 Blijvende afwijking als gevolg van een storing

Een storing uit zich door een verschuiving van de statische karakteristiek. Dit kan worden voorgesteld door een verandering van x_0 , b.v. de omgevingstemperatuur.

Als x_0 toeneemt met dx_0 dan stijgt ook x met een bedrag dx .

Vandaar:

$$x + dx = w \cdot \frac{k_R \cdot k_S}{1 + k_R \cdot k_S} + (x_0 + dx_0) \frac{1}{1 + k_R \cdot k_S}$$

De afwijking dx wordt dus enkel veroorzaakt door:

$$dx = dx_0 \cdot \frac{1}{1 + k_R \cdot k_S}$$

Besluit: de afwijking dx veroorzaakt door een storing dx_0 , is des te kleiner naarmate de kringversterking $k_R \cdot k_S$ groter is.

3. Dynamische responsies van regelaar en proces

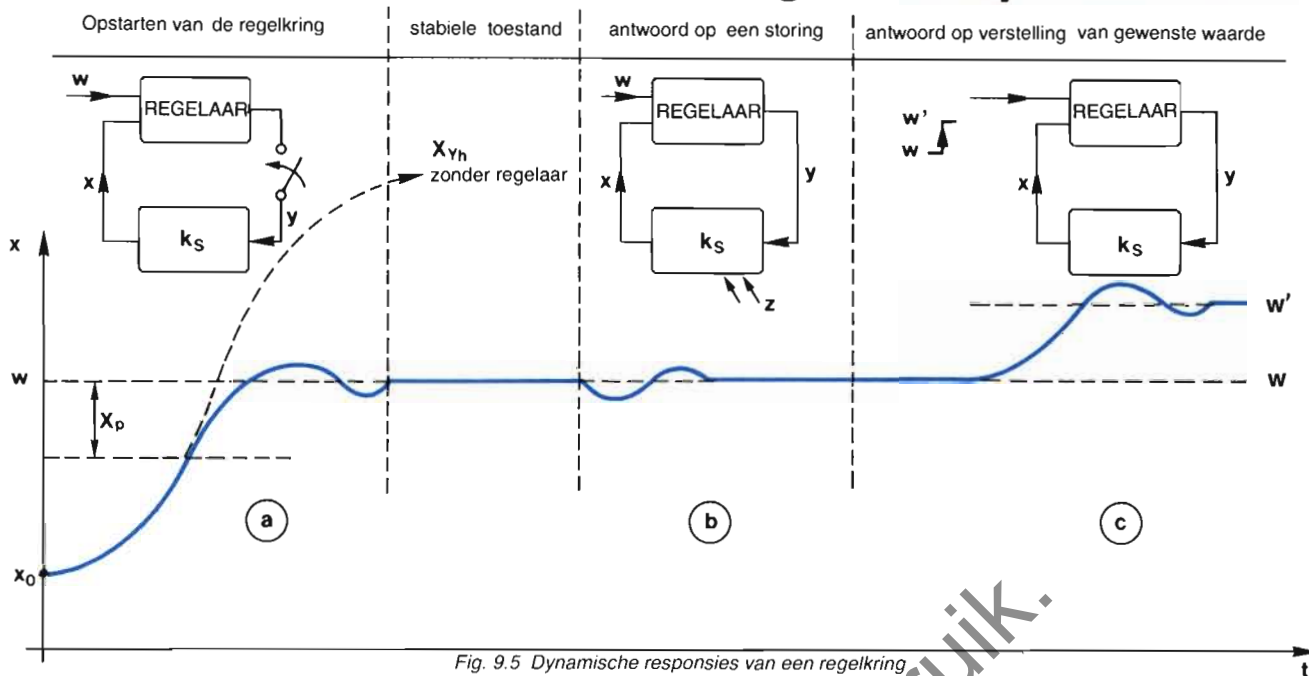


Fig. 9.5 Dynamische responsies van een regelkring

Om na te gaan of de regelaar goed aangepast is aan het proces is een zogenaamd dynamisch onderzoek nodig. Er wordt een verandering in de gesloten kring gestart en men gaat na hoe de proceswaarde hierop reageert. Er zijn drie manieren om dit te doen: het starten van de kring, een storing veroorzaken en de gewenste waarde verstellen. In fig. 9.5 zien we telkens een ideale reactie van de gesloten kring, snel, met weinig doorslingeringen en volledig bereiken van de gewenste waarde. Omwille van de blijvende afwijking weten we nu reeds, dat de P-regelaar alleen, dit niet aankan.

3.1 Opstarten van de regelkring

Ligt de startwaarde x_0 beneden de proportionele band X_p , dan zal na het inschakelen van het proces de waarde y op Y_h staan (prop. bijdrage), zodat x snel stijgt. Als x de proportionele band binnendringt, zal de P-regelaar de waarde y verkleinen, zodat x minder snel zal stijgen. Zie fig. 9.5.a. De bedoeling is, dat de regelaar ervoor zorgt dat de gewenste waarde w zo snel mogelijk en met zo weinig mogelijk doorslingeringen bereikt wordt. We zullen verder zien dat het opstarten van een regelkring doorgaans zo niet gebeurt. Dit antwoord zullen we dan ook enkel bespreken bij de P-regelaar, omdat de werking van de P-regelaar in de gesloten kring hierbij duidelijk uit te beelden is.

3.2 Antwoord op een storing

Als een storing z de x -waarde doet veranderen dan moet de regelaar ervoor zorgen dat w zo snel mogelijk opnieuw bereikt wordt met zo weinig mogelijk doorslingeringen. Dit is in fig. 9.5.b geïllustreerd.

3.3 Antwoord op een verstelling van de wenswaarde

In fig. 9.5.c wordt de wenswaarde w plots op niveau w' gebracht. Ook hier moet de regelaar de nieuwe wenswaarde w' zo snel mogelijk en met weinig doorslingeringen instellen.

We doen opmerken dat in fig. 9.5 alle regelingen optimaal zijn voorgesteld. Ook is er geen blijvende afwijking getekend. Om dit te kunnen realiseren moet de regelaar naast een P-actie ook beschikken over een I-actie. Dit zullen we iets verderop bespreken.

4. Wisselwerking van proces en regelaar

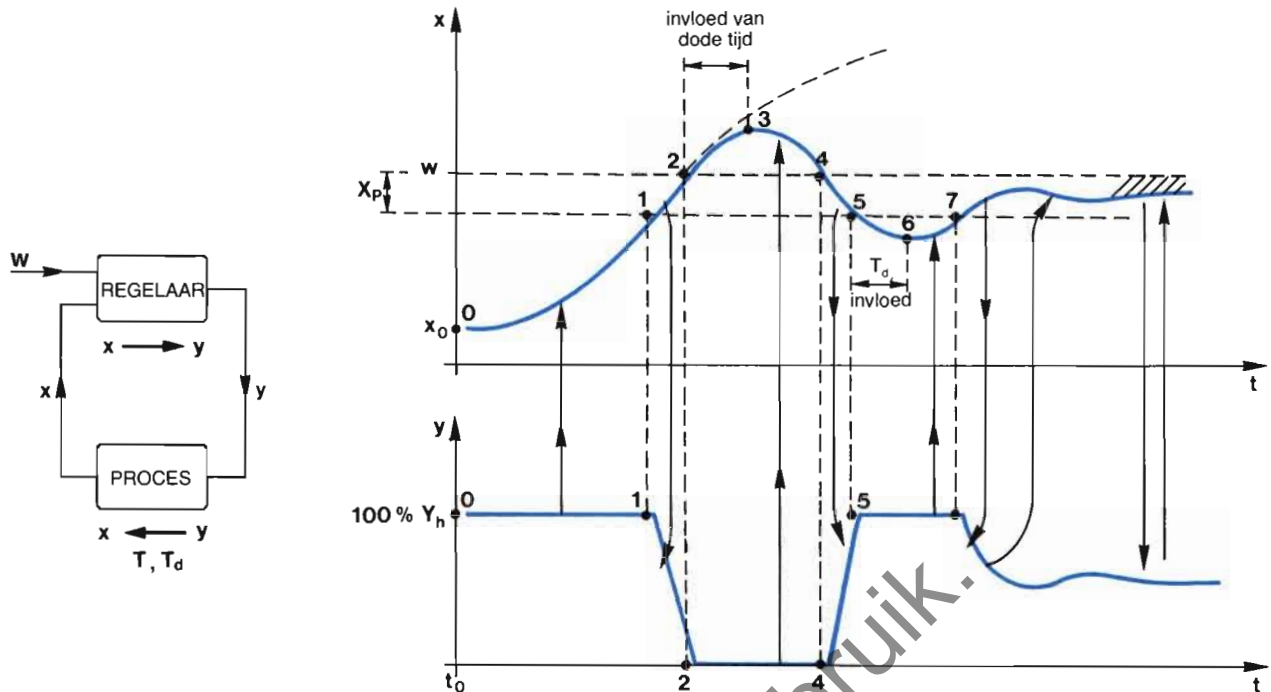


Fig. 9.6 Opstarten P-regelaar

4.1 Redeneren in gesloten kring

De verschijnselen beredeneren in gesloten systemen is niet gemakkelijk. Inderdaad, de proceswaarde x beïnvloedt via de regelaar de klepstand y en de klepstand y beïnvloedt via het proces de proceswaarde x , die op zijn beurt ... enz...

Men moet dus voortdurend redeneren van x naar y , daarna van y naar x , weer van x naar y enz. Hierbij moet men telkens rekening houden met de eigenschappen van de gekozen regelaar en met de eigenschappen van het proces. Daarom is het zo belangrijk deze eigenschappen in open kring eerst besproken te hebben.

We onderscheiden twee mogelijke toestanden:

- de proceswaarde x beïnvloedt de klepstand y .
De manier van beïnvloeding hangt af van de gekozen regelaar: P, PI, PD of PID en de instelling van de kracht van de regelaar.
- de klepstand y beïnvloedt de proceswaarde x .
Zeer belangrijk is nu de vertraging veroorzaakt door de tijdconstante T van het proces, en de dode tijd T_d . Vooral deze laatste kan voor slingerbewegingen zorgen.

4.2 Opstarten van proces met P-regelaar

Beschouwen we het opstarten van een P-regelaar en een proces, bijvoorbeeld een temperatuurregeling. We starten op tijdstip t_0 , bij een omgevingstemperatuur x_0 . De P-regelaar is van het type zonder voorinstelling. Zie fig. 9.6.

- Interval: 0-1 : omdat x beneden de proportionele band ligt, is y volledig open en de temperatuur x loopt op.
- 1-2 : x dringt de PB-band binnen, waardoor y daalt tot 0 (punt 2).
- 2-3 : ondanks het feit dat $y = 0$, zal x niet onmiddellijk dalen. Dit om twee redenen. Bij een smalle PB is de vermogentoevoer y vrij lang op maximum gebleven. In 2 is er nog steeds energieoverschot zodat x blijft stijgen. Door de dode tijd van het proces zal het sluiten van y pas effect hebben na de dode tijd (punt 3).
- 3-4 : x daalt maar omdat x boven w ligt, blijft y onveranderd nul.
- 4-5 : x daalt in de PB, y stijgt tot maximum (punt 5)
- 6-7 : hierdoor zal x terug stijgen, maar dit na de dode tijd T_d .
- 7 : Vanaf punt 7 dringt x opnieuw de PB binnen, y daalt, waardoor na een tijdje x terug daalt tot een uiteindelijke stabiele instelling bereikt wordt. Nu houdt x via de regelaar y vast terwijl y via het proces de x -waarde bepaalt.

5. Startresponsie van P-regelaar en proces

We beschouwen de stapresponsie na het opstarten van een proces met P-regelaar zonder voorinstelling. Achtereenvolgens beschouwen we deze combinatie met een grote proportionele band, een juist gekozen PB en een te kleine PB .

5.1 Grote proportionele band

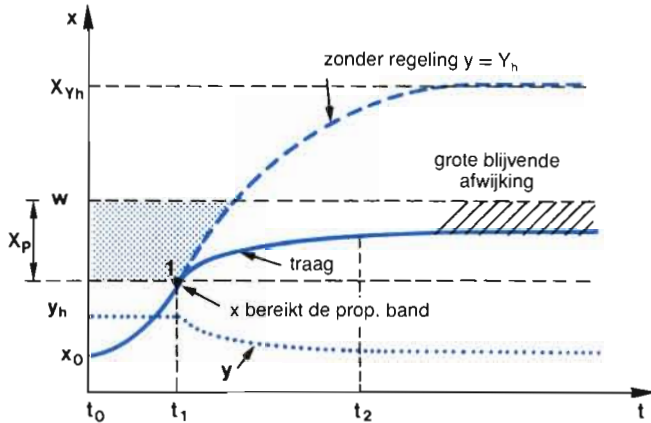


Fig. 9.7 Grote PB veroorzaakt grote afwijking

Op $t = t_0$ wordt de gesloten kring gestart. De proceswaarde start bij $x = x_0$, de afwijking t.o.v. w is dus groot en $y = Y_h$. De proceswaarde x verloopt zoals de streeplijn in fig. 9.7. Met de regelaar zal x reeds op t_1 de proportionele band binnendringen. Dit gebeurt reeds vroeg door de hoge waarde van X_p . Daarom zal ook de y -waarde vroeg afnemen. Er zal steeds minder vermogen het proces instromen waardoor x vanaf t_1 steeds trager zal stijgen. Op t_2 bereikt men de regimetoestand waarbij de statische instelling van x ver van w verwijderd is. Er ontstaat een blijvende afwijking die groot is. Door de grote PB of kleine k_R "kruip" de proceswaarde veel te traag naar de regime of statische toestand.

5.2 Juist gekozen proportionele band

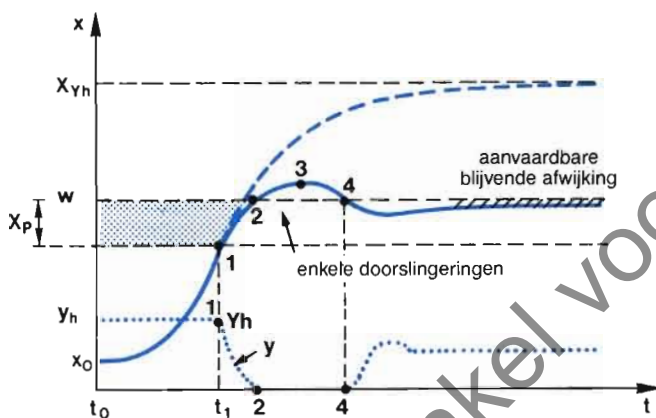


Fig. 9.8 Juiste PB geeft aanvaardbare afwijking

In fig. 9.8 werd de PB (of X_p) van de regelaar kleiner ingesteld zodat x de proportionele band later bereikt. Nu blijft $y = Y_h$ langer aanhouden zodat x sneller stijgt.

Vanaf punt 1 begint y te dalen. In 2 is $x = w$ of $y = 0$ zodat er geen vermogen meer naar het proces loopt.

Door het overschot aan energie, stijgt x boven w . Eerst na de dode tijd zal x in punt 3 dalen. Wordt x kleiner dan w , dan zal y terug toenemen, enz. tot x een stabiele waarde aanneemt. De blijvende afwijking is tot een aanvaardbare waarde herleid en de oscillatie is niet overdreven groot.

Dit is bereikt door een juiste PB of versterking k_R in te stellen.

5.3 Te kleine proportionele band

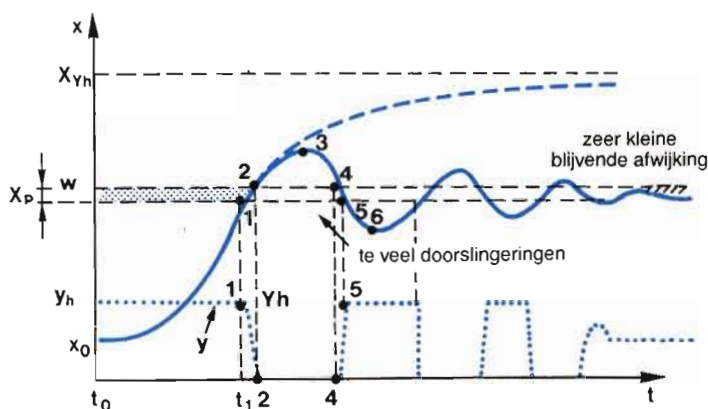


Fig. 9.9 Kleine PB veroorzaakt oscillaties

De versterking k_R van de regelaar wordt groot ingesteld, PB klein, dus X_p klein (fig. 9.9).

Omdat x zeer laat de proportionele band bereikt, blijft $y = Y_h$ zeer lang aanhouden. Door het hoge overschot aan vermogen zal x nu ver over w gaan zelfs als in punt 2 $y = 0$. Na de dode tijd keert x in punt 3 terug om en daalt.

Van 4 naar 5 stijgt y van 0 naar Y_h , waardoor x na de dode tijd vanaf punt 6 weer gaat stijgen enz.

De blijvende afwijking zal klein zijn maar de uitregeling is veel te oscillerend. De versterking k_R is te groot of de PB is te klein.

6. P-regelaar en proces: verstellen van wenswaarde

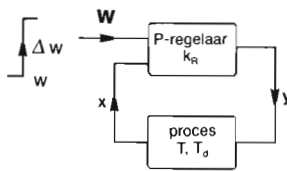


Fig. 9.10 De wenswaarde wordt plots gewijzigd in regelketen

In fig. 9.10 beschouwen we opnieuw een gesloten regelkring waarbij nu de gewenste waarde stapvormig gewijzigd wordt, w naar w' . Om de volgende figuren duidelijk te maken, is de stapprong $w' - w$ overdreven groot gekozen.

Op het ogenblik van de stapprong reageert de regelaar met een toename $\Delta y = k_R \cdot \Delta w$. Hierdoor kan y zelfs tot Y_h toenemen omdat $w' - x$ groot is.

Er wordt meer vermogen toegevoerd in het proces, dus x stijgt. De instelwaarde y zal pas terug afnemen als x in de nieuwe proportionele band x_p komt.

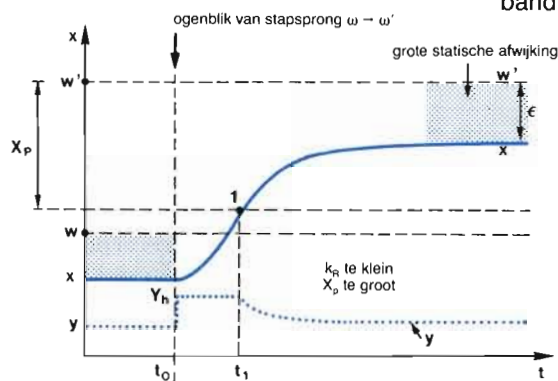


Fig. 9.11 Grote PB veroorzaakt grote afwijking

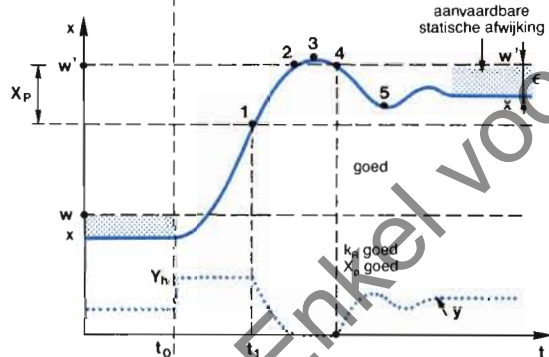


Fig. 9.12 Kleinere PB

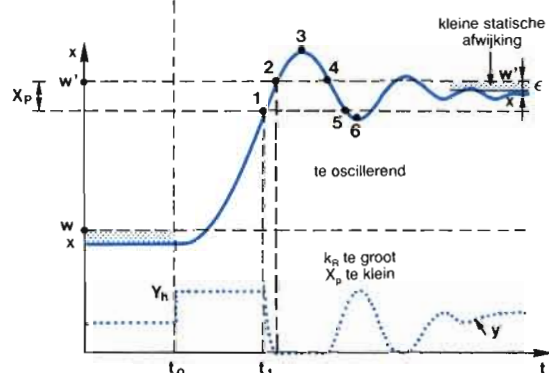


Fig. 9.13 PB is te klein, dus oscillaties

6.1 Grote proportionele band

In fig. 9.11 is PB te groot gekozen. Bij een grote X_p (k_R te klein) bereikt x reeds vroeg X_p zodat y ook vroeg begint af te nemen. Vanaf punt 1 zal x onmiddellijk minder snel toenemen om uiteindelijk een nieuwe statische waarde aan te nemen. De nieuwe blijvende afwijking ϵ is echter te groot. De proceswaarde x "kruip" traag naar de nieuwe statische toestand.

6.2 Kleinere proportionele band

In fig. 9.12 wordt PB kleiner gekozen dan in fig. 9.11. Nu zal x later de proportionele band ingaan waarna y vanaf punt 1 begint te dalen. Door het overschot aan toegevoerd vermogen en de dode tijd kan x op 2 over w' heengaan waarna x in 3 daalt. In 4 gaat x terug onder w' waardoor y terug gaat stijgen. Wegens de dode tijd heeft dit pas in 5 resultaat zodat dan x opnieuw stijgt... enz.

De uiteindelijke statische afwijking ϵ is in fig. 9.12 kleiner dan in fig. 9.11.

Door een goede keuze van k_R of PB kan de oscillerende tendens binnen aanvaardbare grenzen gehouden worden.

6.3 Te kleine proportionele band

Als X_p te klein is (k_R te groot) dan zal x zeer laat de proportionele band ingaan. Er is veel energieoverschot zodat x in punt 2 ver boven w' doorschiet zoals in fig. 9.13 is weergegeven. Hoewel reeds in punt 2 $y = 0$ zal x pas vanaf 3 afnemen onder invloed van de dode tijd. Van 4 naar 5 gaat y van 0 naar Y_h . Wegens de dode tijd heeft dit eerst resultaat na punt 6 waarna x terug stijgt... enz.

De statische afwijking ϵ is wel klein maar de uitregeling gebeurt te oscillerend, dit omdat k_R te groot is of PB te klein.

7. P-regelaar en proces: storingsantwoord

In fig. 9.14 stellen we een stapvormige storing voor, bijv. een plotse daling van de omgevingstemperatuur op het ogenblik t_0 . Hierdoor daalt x en bekomen we een toename van $w - x$. Ook hier heeft de grootte van de proportionele band een grote invloed op de responsie van de proceswaarde x . Om dit te illustreren onderscheiden we weer drie mogelijke toestanden.

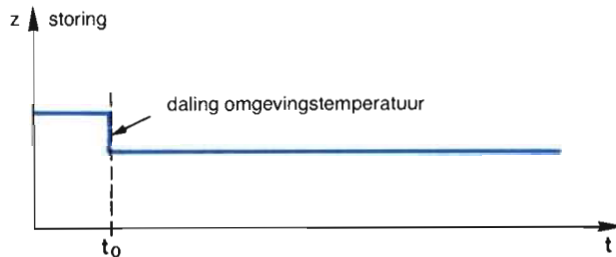


Fig. 9.14 Stapvormige storing

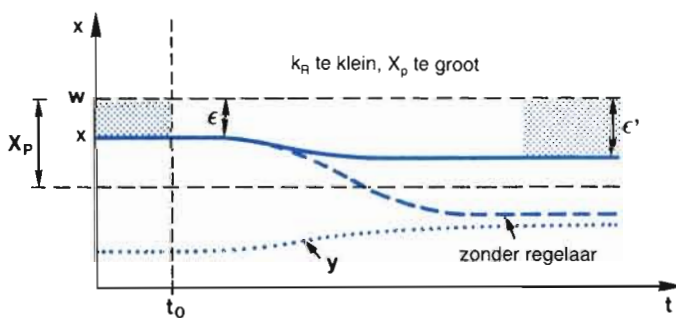


Fig. 9.15 PB is te groot gekozen

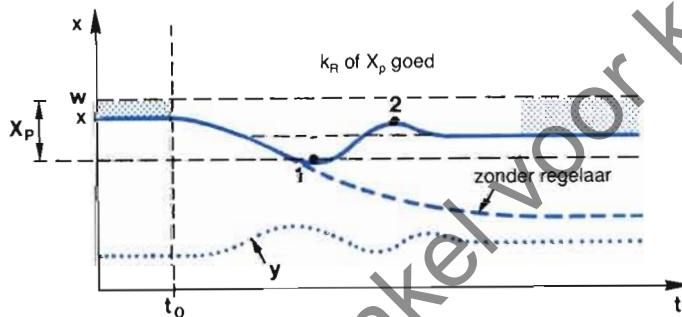


Fig. 9.16 PB is goed gekozen

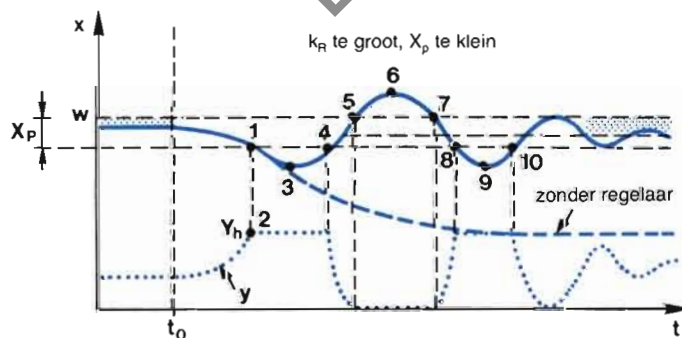


Fig. 9.17 PB is te klein

7.1 Proportionele band is te groot

Als X_p groot is dan is k_R klein. Nu zal de toename van $w - x$ slechts een kleine toename van y veroorzaken. Hierdoor beweegt x traag naar een nieuwe blijvende afwijking ϵ' die relatief groot is. Zie fig. 9.15.

7.2 Proportionele band is correct

Nu is X_p kleiner en dus k_R groter gekozen. Een toename van $w - x$ zal nu een grote toename van y veroorzaken. Door de vertragingen in het proces zal iets later x daarop reageren en dus in punt 1 gaan stijgen. Zie fig. 9.16. Dan vermindert $(w - x)$ waardoor dadelijk y vermindert. Iets later zal x in punt 2 weer gaan afnemen enz. Bij een goed gekozen k_R kunnen we de uitregeling zo doen verlopen dat slechts twee of drie kleine uitslingeringen voorkomen zoals in fig. 9.16 is weergegeven. De proportionele band is hier correct ingesteld.

7.3 Proportionele band is te klein

Een kleine X_p betekent een grote k_R . Na de storing zal x wel de proportionele band verlaten in punt 1 van fig. 9.17. Gelijktijdig stijgt y tot Y_h in punt 2. Door de procesvertragingen zoals de dode tijd en tijdconstante zal iets later x in punt 3 stijgen. Omdat de y -waarde Y_h bereikt heeft, wordt maximum vermogen naar het proces gestuurd en zal x nu snel aangroeien. Zelfs als van 4 naar 5 y terug naar nul gaat, is de toevoer van energie nog te groot geweest zodat x ver boven w doorschiet. Eerst vanaf 6 zal x weer dalen, en op 7 de proportionele band ingaan waardoor y weer stijgt. Hierdoor zal iets later in punt 8 x weer stijgen... enz. De uitregeling is te oscillerend zoals in fig. 9.17 duidelijk is weergegeven.

Besluit: een te grote k_R (te kleine X_p) maakt de blijvende afwijking kleiner, maar is wel oorzaak van onstabiliteit waardoor x te oscillerend wordt.

Opmerking:

1. We zien in de figuren 9.16 en 9.17 een faseverschuiving van 180° tussen de bewegingen van x en y .
2. De P-regelaar alleen kan x niet naar w brengen. Hiervoor moet een I-actie toegevoegd worden.

8. I-regelaar en proces: verstellen van gewenste waarde

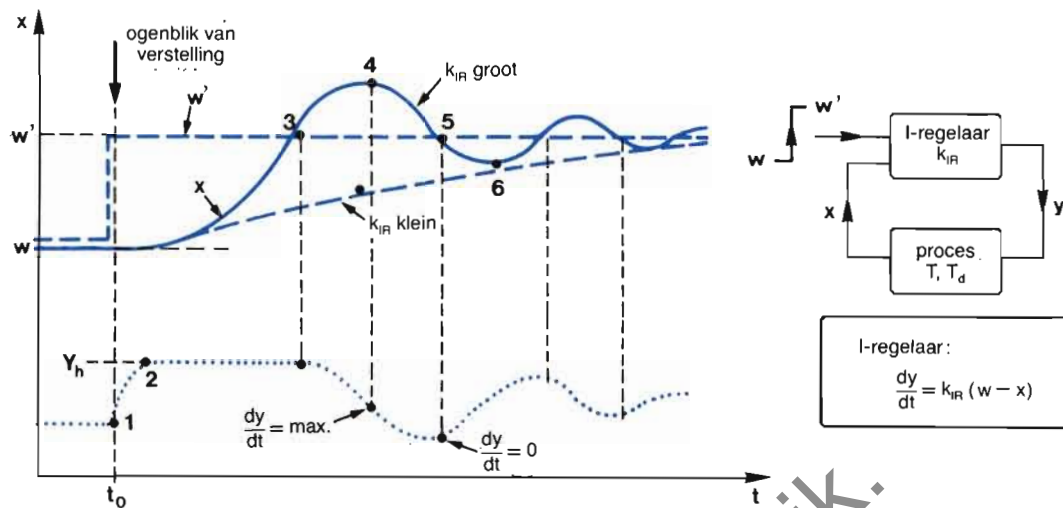


Fig. 9.18 Stapantwoord van I-regelaar en proces

De I-actie is nodig om de blijvende afwijking weg te werken. Hoe gedraagt zich de gesloten kring als de I-regelaar er alleen voor staat?

De dynamische responsie van de I-regelaar en proces, na het verstellen van de gewenste waarde volgens een sprong, is afgebeeld in fig. 9.18. Hierbij veronderstellen we dat op het ogenblik t_0 de gewenste waarde w plots toeneemt tot het niveau w' . We steunen in de redenering op de eigenschap van de I-regelaar: de snelheid waarmee y verandert

of $\left(\frac{dy}{dt}\right)$ is evenredig is met de afwijking $(w - x)$

Op het ogenblik van de sprong is $w' - x$ of $(w' - w)$ groot en positief. De uitgang y van de regelaar stijgt vanaf punt 1 met hoge snelheid. Wil men de eindwaarde w' snel bereiken dan moet k_{IR} groot zijn. De regelaar is dan krachtig ingesteld en y stijgt snel, zodat y eventueel snel Y_h bereikt. Zie punt 2 in fig. 9.18.

Door de vertragingen (dode tijd, tijdconstanten) zal x een tijdje later ook stijgen. De instelwaarde y van de I-regelaar kan pas beginnen te dalen als $w' - x$ van teken omkeert, dus voorbij het punt 3 (kijk terug op blz. 128). Nu stijgt x boven w' omdat er teveel energie werd toegevoerd wegens het feit dat $y = Y_h$.

Naarmate $w' - x$ in het gebied 3-4 groter wordt, zal y sneller dalen. Na een tijd moet x eveneens terug dalen (4). Wordt $w' - x$ kleiner dan daalt y minder snel.

In punt 5 is $w' - x = 0$, zodat de snelheid van y eveneens nul wordt. Voorbij 5, keert het teken van $w' - x$ om en wordt terug positief, waardoor y weer gaat stijgen enz.

De x -waarde gaat oscillerend naar w' toe.

Maakt men k_{IR} kleiner, zodat de snelheid waarmee y verandert ook kleiner wordt, dan kan de oscillerende tendens weggewerkt worden. Hierdoor zal x zeer traag naar w' bewegen zoals de streep in fig. 9.18 weergeeft.

Besluit: vooral rond de nuldoorgangspunten 3,5 ... is de I-regelaar zeer traag omdat $w' - x$ zeer klein is. Hierdoor krijgt x de kans om verder uit te wijken; het uitregelen gebeurt oscillerend. De periode van de oscillerende beweging is relatief groot.

Opmerking:

We bemerken in fig. 9.18 ook een faseverschuiving van 90° tussen de slingerbeweging van x en y . Bij een I-regelaar is x precies 90° naaijend op y .

9. I-regelaar en proces: storingsantwoord

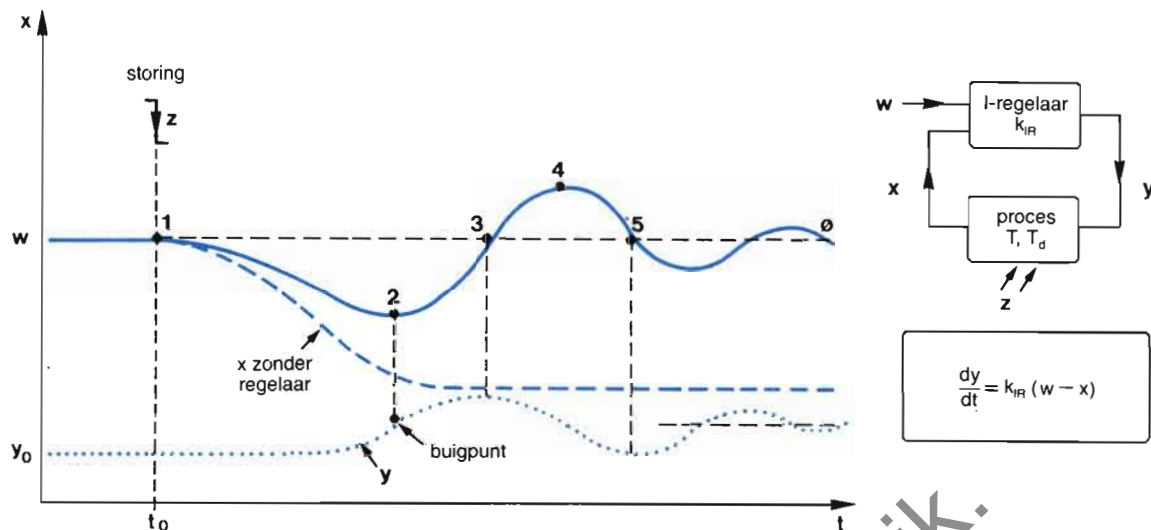


Fig. 9.19 Reactie van I-regelaar op een storing

De dynamische responsie van de I-regelaar en proces na een storing, is in fig. 9.19 afgebeeld. Beschouwen we een temperatuursregeling waar de toestand $x = w$ wordt vastgehouden door $y = y_0$ van de I-regelaar. We nemen aan dat op ogenblik t_0 de omgevingstemperatuur plots afneemt. Vanaf t_0 zal x deze temperatuurdaling volgen en eveneens dalen. Onmiddellijk na punt 1, is $w - x$ nog zeer klein. Hoewel de I-regelaar y doet toenemen om meer vermogen in het proces te sturen, zal dit zeer traag beginnen. Inderdaad, de snelheid van een I-regelaar is evenredig met $w - x$.

Hierdoor zal de correctie van y onbeduidend zijn, zodat x ver kan afnemen.

Naarmate x daalt, wordt $w - x$ groter en zal de snelheid waarmee y stijgt vergroten. De corrigerende invloed van y laat zich uiteindelijk gevoelen vanaf punt 2, waar x terug gaat stijgen.

Hierdoor gaat $w - x$ dalen zodat de snelheid van y vermindert. In punt 3 is $x = w$ zodat $w - x = 0$ en $\frac{dy}{dt} = 0$.

Zolang $x < w$ zal y voortdurend stijgen en wordt er teveel vermogen in het proces gestuurd. Hierdoor wordt x groter dan w . Het teken van $w - x$ keert om en wordt negatief waardoor y terug gaat dalen.

Na een tijd, bepaald door de vertragingen van het proces, zal door het verminderen van de vermogentoevoer x vanaf punt 4 weer gaan dalen. Hierdoor daalt y minder snel en in punt 5, als $x = w$ zal y even stilstaan. Voorbij punt 5 wordt $w - x$ weer positief enz...

Besluit: de I-regelaar is een trage regelaar, vooral als $w - x$ klein is. In het begin van de afwijking heeft de I-regelaar nauwelijks invloed zodat x ver kan uitwijken.
 Nu kan y pas van richting omkeren als $w - x$ van teken verandert.
 Het uitregelen gebeurt oscillerend, maar uiteindelijk zal x gelijk worden aan w , er is dus geen blijvende afwijking.
 De oscillerende beweging heeft een relatief grote periode.
 Er is een P-actie nodig om, vooral bij plotse kleine afwijkingen $w - x$, dadelijk in te grijpen in het proces.

10. PI-regelaar en proces: verstellen van wenswaarde

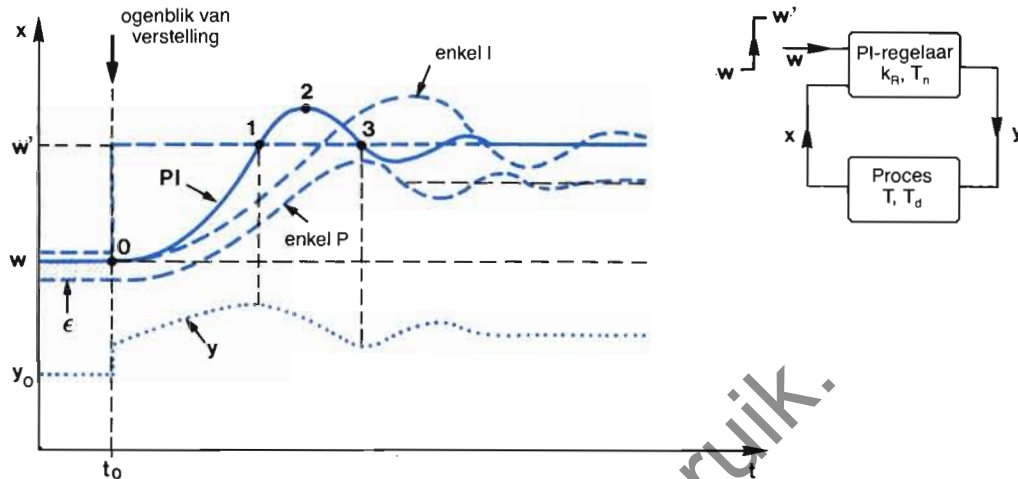


Fig. 9.20 Gedrag PI-regelaar na plots verstellen van w

De dynamische responsie van de PI-regelaar en proces na het verstellen van de gewenste waarde wordt in fig. 9.20 getoond.

Veronderstel dat op ogenblik t_0 de gewenste waarde w plots toeneemt tot w' .

Om het verloop van de proceswaarde x te verantwoorden, beschouwen we de volgende punten:

punt 0: onmiddellijk bij het verstellen van de gewenste waarde wordt de afwijking plots $w - x = w' - w$. De P-regelaar zal y onmiddellijk verstellen met een bedrag proportioneel met:

$$w' - w \text{ of } \Delta y = k_R (w' - w).$$

Op dit moment heeft de I-regelaar nog niets gedaan.

0 ... 1: Dadelijk na punt 0 laat de I-regelaar y toenemen met een vertreksnelheid evenredig met $w' - w$. Nu zal x gaan toenemen, dus $w' - x$ wordt kleiner hetgeen de volgende weerslag op y heeft:

- de proportionele bijdrage zal verminderen;
- de I-regelaar laat y verder stijgen, maar met steeds kleiner wordende snelheid.

punt 1: $w = w'$, $w' - x = 0$, de proportionele bijdrage is nul geworden, de I-regelaar houdt y constant.

1 ... 2: x wordt groter dan w' of $w' - x$ wordt negatief. De I-regelaar laat y nu verminderen, dit laat zich een tijdje later gevoelen zodat x terug gaat dalen.

2 ... 3: x daalt waardoor de snelheid waarmee y daalt, afneemt.

punt 3: $x = w'$, $w' - x = 0$ waardoor y niet meer verandert.

3 ...: $w' - x$ wordt positief en stijgt met de volgende weerslag op y :

- de P-regelaar doet y weer stijgen proportioneel met $w' - x$.
- de I-regelaar doet y stijgen met een snelheid evenredig met $w' - x$.

Door k_R en T_n goed in te stellen, kan men een situatie bereiken waarbij het uitregelen voldoende snel gebeurt en met slechts enkele doorslingeringen.

Besluit: de PI-regelaar is t.o.v. de I-regelaar sneller en de periode van de oscillatie is kleiner. De PI-regelaar zorgt dat de blijvende afwijking van de P-regelaar nul wordt.

11. PI-regelaar en proces : storingsantwoord

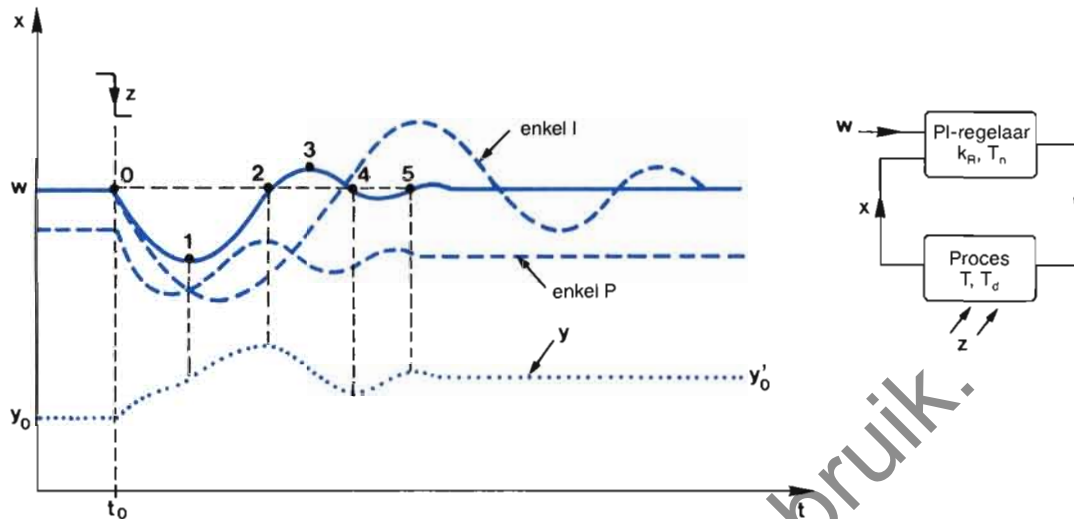


Fig. 9.21 Gedrag PI-regelaar en proces na een storing

De dynamische responsie van de PI-regelaar en proces na een storing is voorgesteld in fig. 9.21. We beschouwen weer een temperatuurregeling waarvan de omgevingstemperatuur op t_0 plots daalt. Een dergelijke storing zal zich zelden voordoen als een sprong. Doorgaans zal, wegens de storing, de x -waarde met een bepaalde snelheid beginnen af te wijken van w . We beschouwen de volgende tijdsintervallen:

- 0 ... 1:** onmiddellijk nadat x daalt en afwijkt van w zal:
- de P-regelaar y doen toenemen met een bedrag evenredig met $w - x$;
 - de I-regelaar y doen stijgen met een snelheid evenredig met $w - x$.
- In het begin van de afwijking, als $w - x$ nog klein is, zal de I-regelaar dus weinig invloed hebben.
- 1 ... 2:** door de procesvertragingen zal het stijgen van y eerst effect vertonen na punt 1, zodat $w - x$ kleiner wordt.
- de P-regelaar laat y dalen;
 - de I-regelaar laat y nog stijgen maar met steeds kleinere snelheid.
- 2:** Nu is $w - x = 0$, de uitgang van de P-regelaar is nul, de I-regelaar houdt y constant. ($\frac{dy}{dt} = 0$)
- 2 ... 3 ... 4:** $x > w$ of $w - x$ wordt negatief; de I-regelaar doet y verminderen, hetgeen zijn invloed heeft voorbij punt 3 waar x weer gaat dalen. y daalt minder snel en in 4 staat y weer stil ... enz...

Besluit: het toevoegen van de I-actie aan de P-regelaar maakt de regeling krachtiger, de oscilleerneiging wordt groter, doch de blijvende afwijking wordt nul.

De I-regelaar alleen is zeer traag, zodat x de kans heeft verder uit te wijken. Het toevoegen van een P-actie aan een I-regelaar dempt de afwijking in het begin van de storing.

12. PD-regelaar en proces: storingsantwoord

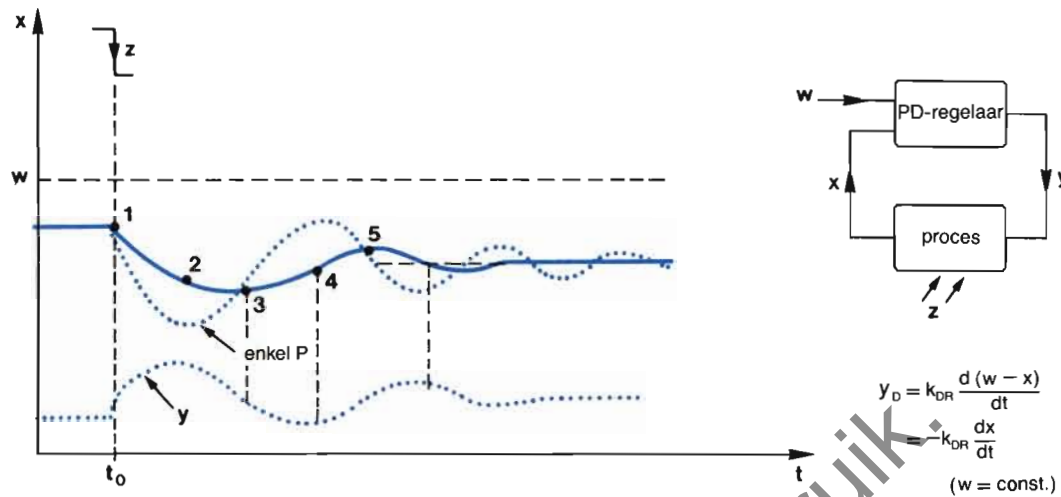


Fig. 9.22 Gedrag PD-regelaar en proces in storing

De dynamische responsie van een PD-regelaar en proces na een storing wordt in fig. 9.22 getoond.

Stel dat een plotse storing z op ogenblik t_0 de proceswaarde x doet afnemen.

De D-bijdrage is evenredig met de snelheid waarmee x verandert.

- **daalt** x snel dan is er een sterke D-actie door **een toename** van y (Δy is positief);
- **stijgt** x snel dan ontstaat een sterke D-actie door **een afname** van y (Δy is negatief).

We beschouwen in fig. 9.22 de volgende punten:

1. direct bij de aanvang van de storing is de snelheid waarmee x verandert groot, de D-actie is sterk en we bekomen een sterke toename van y ;
2. dit heeft zijn weerslag op x , zodat x iets later minder snel zal dalen, dan in het geval de P-regelaar alleen zou staan;
3. x verandert niet meer of $dx/dt = 0$ zodat de D-bijdrage nul wordt;
- 3 ... 4 x stijgt terug, de D-actie zal y doen dalen met een amplitude evenredig met dx/dt . In punt 4 is dx/dt maximum, dus maximale afname van y , waardoor iets later x minder snel stijgt enz...

Besluit: door het toevoegen van een D-actie aan de P-regelaar wordt een sterke demping uitgeoefend op de beweging van x .

De D-actie is het meest actief in de nuldoorgangen van de oscillerende uitregeling.

Zo regelt de D-actie reeds vooruit op de komende afwijking.

Hierdoor kan men de versterking van de P-regelaar groter kiezen, zonder de uitregeling te oscillerend te maken.

Bovendien wordt dan de blijvende afwijking kleiner.

Opmerking:

In sommige processen kan een te sterke D-actie omslaan naar oscilleren. De oscillatie heeft een hogere frequentie (kleinere periode) dan deze die veroorzaakt wordt door een te kleine PB.

13. PID-regelaar en proces : storingsantwoord

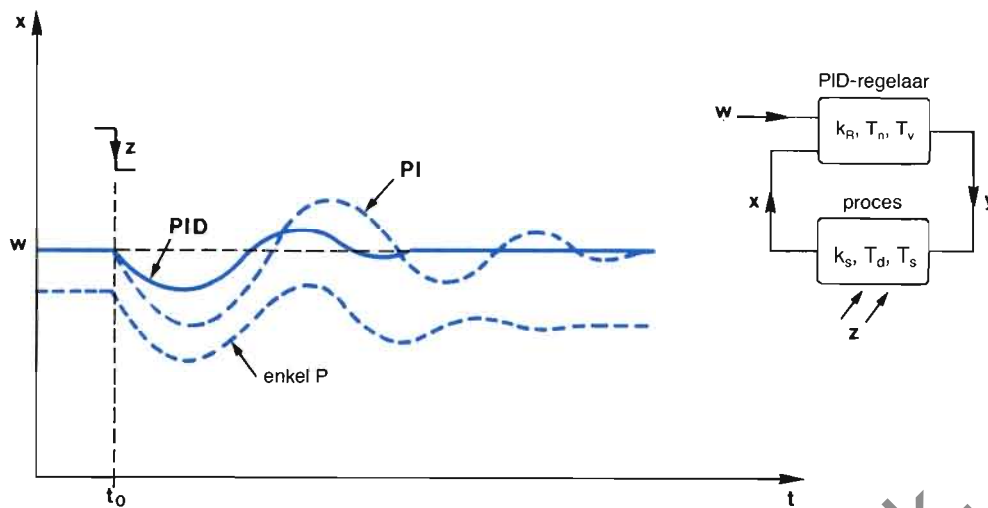


Fig. 9.23 Gedrag PID-regelaar en proces na storing

Een uitwendige storingsbron z beïnvloedt het proces op het ogenblik t_0 zodat de proceswaarde x afneemt. De dynamische responsie van een PID-regelaar en proces wordt in fig. 9.23 weergegeven.

Uit de vorige afleidingen volgt :

1. Bij een goed ingestelde P-regelaar, wordt na enkele oscillerende bewegingen, de nieuwe blijvende afwijking bereikt.
2. Wordt een I-regelaar toegevoegd, dan wordt met dezelfde versterking van de P-regelaar, de uitregeling iets meer oscillerend, omdat de I-actie de P-actie versterkt. De blijvende afwijking wordt door de I-actie wel tot nul herleid.
3. Wordt bij de PI-regelaar nog een D-actie toegevoegd, dan ontstaat een gedempte beweging omdat de D-actie een snelle verandering van x tegenwerkt, en zodoende vooral tijdens de nuldoorgangen reeds krachtig tegenwerkt, vooruitlopend op de komende afwijking.

Besluit :

- de I-actie wordt toegevoegd om de blijvende afwijking van de P-regelaar weg te werken.
- Hierdoor wordt de uitregeling iets meer oscillerend.
- Om dit oscilleren te dempen wordt de D-actie toegevoegd.

We onthouden :

- hoe groter k_R en hoe kleiner T_n
 - hoe groter k_R en hoe groter $r = \frac{1}{T_n}$
 - hoe groter T_v
- $\left. \begin{array}{l} \Rightarrow \text{des te sterker wordt het oscilleren tijdens de uitregeling.} \\ \Rightarrow \text{des te sterker wordt de oscilleerneiging gedempt.} \end{array} \right\}$

14. Praktisch meten van een dynamische responsie

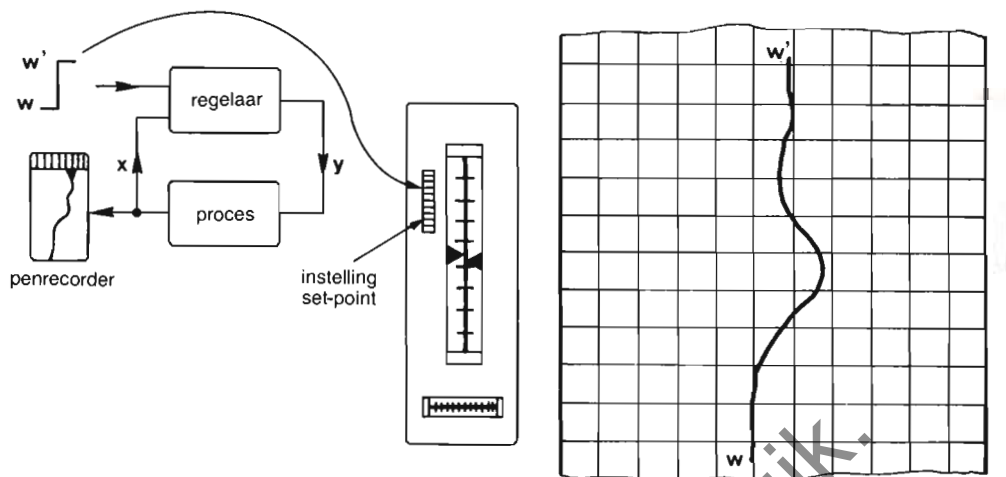


Fig. 9.24 Onderzoek van een gesloten kring d.m.v. een stapsprong

Om te oordelen of regelaar en proces nog correct zijn afgesteld, moeten we beschikken over een stapresponsie van de gesloten kring.

De opstartkarakteristiek opnemen is meestal niet toelaatbaar en wordt in de praktijk ook zelden toegepast. De grote verandering van de proceswaarde x zou ongewenste effecten in een bestaande en werkende installatie kunnen veroorzaken. Om een storingsresponsie te simuleren verstellen we de gewenste waarde. Deze responsie levert wel niet exact hetzelfde verschijnsel als een storingsresponsie, maar is in de praktijk handig om uit te voeren en met bevredigende resultaten. Om na te gaan of het gedrag van de gesloten kring nog optimaal is gaat men als volgt te werk:

1. Sluit een penrecorder aan op de proceswaarde. In sommige gesloten kringen is permanent een penrecorder aangesloten.
2. Vergewis u eerst hoever de proceswaarde mag afwijken om geen ongewenste effecten in het proces te veroorzaken.
Alvorens tot actie over te gaan, is dus een samenspraak nodig met de deskundigen uit de productie. Over het algemeen zal de verstelling van de gewenste waarde nooit groter gemaakt worden dan 10%.
3. Verstel de gewenste waarde met een stapsprong.
De verstelling moet voldoende snel gebeuren. De tijdsduur van de verstelling moet zeer klein zijn t.o.v. de tijdconstante van het proces.

De kwaliteit van de stapresponsie wordt daarna beoordeeld aan de hand van de grafiek geschreven door de penrecorder.

Is het resultaat te oscillerend of te gedempt, dan moeten de parameters van de regelaar (PB , T_n , T_v) worden bijgesteld.

Dit bijstellen moet op deskundige wijze gebeuren. Men moet de effecten van het verdraaien van de instelknoppen goed kennen. Afregelprocedures worden in het volgende hoofdstuk gedetailleerd besproken.

Opmerking:

Ondeskundig veranderen van de parameters van de regelaar, kan de hele afstelling uit de hand doen lopen, waardoor ernstige schade in de kring kan ontstaan.

15. Effect van instelknoppen in de gesloten kring

Het belang van het deskundig verdraaien van de instelknoppen en het veranderen van de parameters werd in vorige paragraaf aangetoond.

Om het effect van het verdraaien van de instelknoppen goed te kennen, volgt hier een bondig overzicht van de verschillende mogelijkheden.

15.1 Instellen van de P-actie

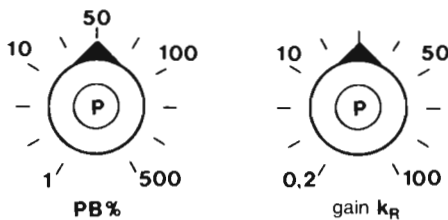


Fig. 9.25

- **Krachtiger instellen van P-actie** (zie fig. 9.25)

- Linksom draaien: PB wordt kleiner. (knop links)
- Rechtsom draaien: k_R wordt groter. (knop rechts)

Dit veroorzaakt een sneller uitregelen, maar een sterkere neiging tot oscilleren

- **Zwakker instellen van P-actie**

- Rechtsom draaien: PB wordt groter. (knop links)
- Linksom draaien: k_R wordt kleiner. (knop rechts)

Er ontstaat nu een trager uitregelen, een grotere demping en een grotere blijvende afwijking als alleen een P-regelaar aanwezig is.

15.2 Instellen van de I-actie

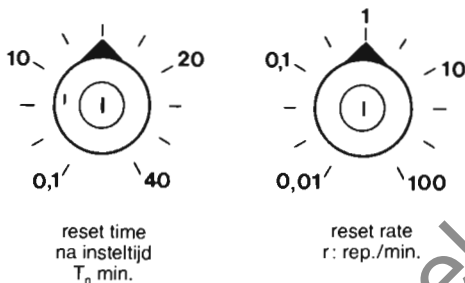


Fig. 9.26

- **Krachtiger instellen van de I-actie** (zie fig. 9.26)

- Linksom draaien: T_n wordt kleiner. (knop links)
- Rechtsom draaien: r wordt groter. (knop rechts)

Dit herleidt de blijvende afwijking van de I-regelaar sneller tot nul, maar veroorzaakt een tendens tot oscillerend uitregelen met een grote periode.

- **Zwakker instellen van I-actie**

- Rechtsom draaien: T_n wordt groter. (knop links)
- Linksom draaien: r wordt kleiner. (knop rechts)

De blijvende afwijking wordt trager tot nul herleid en de proceswaarde evolueert minder oscillerend.

15.3 Instellen van de D-actie

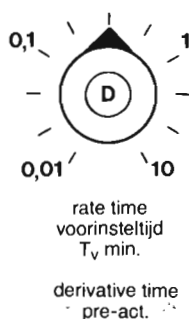


Fig. 9.27.

- **Krachtiger instellen van de D-actie** (zie fig. 9.27)

- Rechtsom draaien: T_v wordt groter.

Dit veroorzaakt een sterkere demping op het uitregelen.

Het toevoegen van de D-actie laat toe de P-actie en de I-actie iets krachtiger in te stellen, omdat de oscilleerneiging van beide door de D-actie gedempt wordt. Te krachtig instellen kan ook een te sterke demping veroorzaken.

- **Zwakker instellen van de D-actie**

- Linksom draaien: T_v wordt kleiner.

Er ontstaat een zwakkere demping, het uitregelen gebeurt sneller.

Opmerking:

Een te krachtig instellen van de D-actie kan in sommige processen aanleiding geven tot omslaan van dampen in oscilleren. Dit oscilleren is duidelijk te herkennen aan de kleinere periode of de hoge frequentie.

In moderne regelaars worden de parameters voorgesteld op een digitaal display. De keuze van de parameter en het instellen van de waarde wordt gerealiseerd via een toetsenbord.

16. Opdrachten

1. Bespreek de statische instelling van de proportionele regelaar en het proces, aan de hand van de statische karakteristieken. Toon de invloed van een hoge of lage versterkingsfactor van de regelaar grafisch aan.
2. Bespreek de statische instelling van P-regelaar en proces, met de formules voor proces en regelaar. Formuleer een besluit aangaande de blijvende afwijking.
3. Geef drie manieren om het dynamisch antwoord van regelaar en proces te bestuderen.
4. Schets het verloop van x_t , na opstarten van P-regelaar en proces als: a. versterking van de regelaar te klein is; b. versterking van de regelaar goed gekozen is; c. versterking van de regelaar te groot is.
5. Schets het verloop van x_t , na het verstellen van de gewenste waarde volgens een stapspiong, in de gesloten kring van P-regelaar en proces. Veronderstel de volgende mogelijkheden: a. proportionele band is te groot; b. proportionele band is goed; c. proportionele band is te klein.
6. Schets het verloop van x_t , na een storing, in de gesloten kring van P-regelaar en proces. Onderzoek de volgende drie mogelijkheden: a. k_R is te klein; b. k_R is goed; c. k_R is te groot. Trek een besluit aangaande de invloed van de waarde van k_R .
7. Bespreek het dynamisch antwoord van I-regelaar en proces na het verstellen van de gewenste waarde volgens een stapspiong. Duid de punten aan waar de I-regelaar snel reageert en waar de I-regelaar traag of zelfs niet reageert.
8. Schets en bespreek het dynamisch antwoord van I-regelaar en proces na een storing. Formuleer uw besluit.
9. Geef het dynamisch antwoord van PI-regelaar en proces na het verstellen van de gewenste waarde. Vergelijk de invloed van de PI-regelaar met de I- en met de P-regelaar.
10. Geef het dynamisch antwoord van de PI-regelaar en proces na een storing. Welke invloed heeft het toevoegen van de I-actie aan de P-regelaar? Welke invloed heeft het toevoegen van de P-actie aan de I-regelaar?
11. Bespreek het dynamisch antwoord van de PD-regelaar en proces na een storing. Welke invloed heeft het toevoegen van de D-actie aan de P-actie?
12. Bespreek het dynamisch antwoord van de PID-regelaar en proces na een storing. Vergelijk de curve met PI- en P-regelaar. Formuleer uw besluit.

Stad Antwerpen
Stedelijk Lyceum
 Hoofdstelling :
 Paardenmarkt 94
 2000 ANTWERPEN
 Tel. 03/470.25.30 - Fax 03/470.25.31

13. Invuloefening

Een te krachtig ingestelde P-regelaar veroorzaakt wel een kleine _____, maar een _____ tendens. Bij een te zwak ingestelde P-regelaar is de uitregeling te _____ (traag-snel) en de blijvende _____ is _____ (groot-klein)

De I-actie wordt aan de P-actie toegevoegd om de _____ van de P-regelaar

Het toevoegen van de I-actie veroorzaakt echter een _____ tendens met _____ (grote-kleine) periode.

Om deze _____ tendens te _____ wordt een _____ toegevoegd.

Een te krachtige D-actie veroorzaakt een te sterke _____

In sommige processen kan een te krachtig ingestelde D-regelaar overslaan naar _____ gekenmerkt met een _____ (kleine-grote) periode of een _____ (hoge-lage) frequentie.

14. Vul telkens in: groter of kleiner.

Krachtiger P-actie	: PB :	_____	k_R :	_____
zwakkere I-actie	: T_n :	_____	r :	_____
krachtiger D-actie	: T_v :	_____		
zwakkere P-actie	: $X_p\%$; PB :	_____	gain:	_____
krachtiger I-actie	: T_n :	_____	r :	_____

15. Vul in: rechtsom of linksom om het gevraagde doel te bereiken:

	→	kleinere blijvende afwijking: _____
	→	sneller uitregelen: _____
	→	trager uitregelen, minder oscilleren: _____
	→	minder oscilleren: _____
	→	minder oscilleren, trager uitregelen: _____
	→	meer oscillerend: _____
	→	minder damping, sneller uitregelen: _____
	→	meer damping: _____
	→	sneller uitregelen, meer oscillerend: _____
	→	kleinere damping: _____

Fig. 9.28