

Blok 6

Aan/uit-regelkringen

Doelstellingen:

Bij de aan/uit-regelaar zal de proceswaarde voortdurend op en neer schommelen. Toch zijn er zowel in de industrie als in huis-, tuin- en keukentoestellen veel toepassingen van aan/uit-regelaars. Het op en neer gaan van de proceswaarde, zolang deze binnen een bepaalde zone blijft, verstoort de bedoeling van het proces niet. Zo zal in een frituurketel de temperatuur binnen een zone op en neer mogen gaan, zonder de kwaliteit van de gebakken frieten nadelig te beïnvloeden. In een strijkijzer mag de temperatuur binnen een zekere band veranderen zonder de kwaliteit van het strijken te verstoren.

Deze regelaars komen het meest voor in niet gestandaardiseerde kleine processen. Ze zijn eenvoudig, goedkoop en bedrijfszeker. De regelaar moet niet afgesteld worden en is direct klaar voor gebruik.

Omdat we dus in ons leven er veel mee te maken hebben, is het wel verantwoord deze regelaar niet te discrimineren en er enige aandacht aan te besteden.

We zullen in een eerste deel (1 ... 6) de werking van enkele toepassingen ontleiden. In een tweede gedeelte (7 ... 13) zullen we de theorie aanhalen en nagaan hoe de proceswaarde reageert op de aan/uit-actie van de regelaar.

We bespreken regelaar en proces direct in de gesloten keten.

Inhoud:

1. Aan/uit-regelkring met bimetaal.
2. Drukregeling in waterleiding.
3. Niveauregeling in opslagtank.
4. Drukregeling in vat van luchtcompressor.
5. Spanningsregeling in een auto.
6. Elektronische aan/uit-regelaar.
7. Aan/uit-regelaar zonder hysteresis en eerste-orde-proces.
8. Amplitude en periode (aan/uit-regelaar + 1^o orde proces).
9. Belang van hysteresis.
10. Aan/uit-regelaar met hysteresis + 1^o orde proces zonder dode tijd
11. Aan/uit-regelaar met hysteresis + 1^o orde proces met dode tijd
12. Amplitude bij aan/uit-regelaar met hysteresis + 1^o orde proces met dode tijd
13. Aan/uit-regelaar bij proces van hogere orde.
14. Vergelijking aan/uit met proportionele regelaar.
15. Opdrachten

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

1. Aan/uit-regelkring met bimetaal



Fig. 6.1 Stand van het bimetaal in functie van de temperatuur.

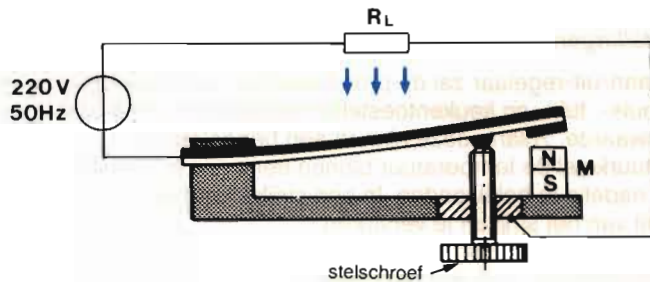


Fig. 6.2 Gesloten regelkring met bimetaal.

Een bimetaal bestaat uit twee tegen elkaar gedrukte metalen plaatjes. Beide hebben een verschillend uitzettingscoëfficiënt. Daarom trekt het bimetaal krom als de temperatuur stijgt. Elke stand van het bimetaal komt dus overeen met een bepaalde temperatuur. In fig. 6.1 zien we een voorbeeld.

In fig. 6.2 is de volledige regelkring getekend. De stand van de stelschroef kan zover worden doorgedraaid dat het bimetaal in een positie staat, die overeenkomt met de gewenste temperatuur. Stijgt de temperatuur dan gaat het bimetaal verder kromtrekken en wordt het contact geopend. De verwarming wordt uitgeschakeld en de temperatuur zal langzaam dalen. Het bimetaal keert terug naar de stelschroef tot er weer contact gemaakt wordt. De verwarming zal weer inschakelen, de temperatuur weer toenemen enz...

De stand van de stelschroef vormt de gewenste waarde, de stand van het bimetaal de proceswaarde. Het bimetaal kan als de sensor opgevat worden. De schakelaar zelf is de regelaar en gelijktijdig het corrigerend orgaan.

In fig. 6.2 zien we dat er een permanent magneetje M bijgeplaatst werd. Zonder dit magneetje zou het contact veel te traag openen en sluiten. Dit veroorzaakt vonkovergangen tussen de contactpunten zodat de slijtage groot zal zijn. Ook het temperatuurverschil tussen openen en sluiten zou zeer klein zijn, waardoor de frequentie van het schakelen verhoogt en dus ook weer de slijtage.

Het bijplaatsen van het magneetje veroorzaakt het volgende effect: als het plaatje dicht genoeg bij het magneetje komt, wordt het plots aangetrokken, zodat het contact krachtig dichtsprint. Ook bij het openen moet de spankracht van het bimetaal dat van het magnetische veld overwinnen, zodat de schakelaar met een klap open-springt. De vonkoverslag wordt hierdoor verminderd. Het temperatuurverschil tussen openen en sluiten wordt nu wel groter, zodat de frequentie van het schakelen verkleint. Dit komt ook de slijtage ten goede. We spreken hier van een hysteresis en we zullen in het tweede gedeelte (vanaf blz. 114) de theorie hiervan verder uitdiepen.

Een aan/uit-regelaar kan ook als volgt uitgevoerd worden: de uitzetting van vloeistof wordt gebruikt om via een balg een schakelaar te sluiten of te openen. Uitzetten van vloeistof wordt bijvoorbeeld toegepast in frigo's. De vloeistof zit in een metalen buis en doet via een membraan de contacten openen en sluiten waarmee dan de motor van de koelinstallatie uit en aan wordt geschakeld.

Aan/uit-regelaars die steunen op de uitzetting van materialen worden veel gebruikt in kookplaten, strijkijzers, wafelijzers, elektrische verwarmingsradiatoren en nog veel andere huistoestellen.

2. Drukregeling in waterleiding

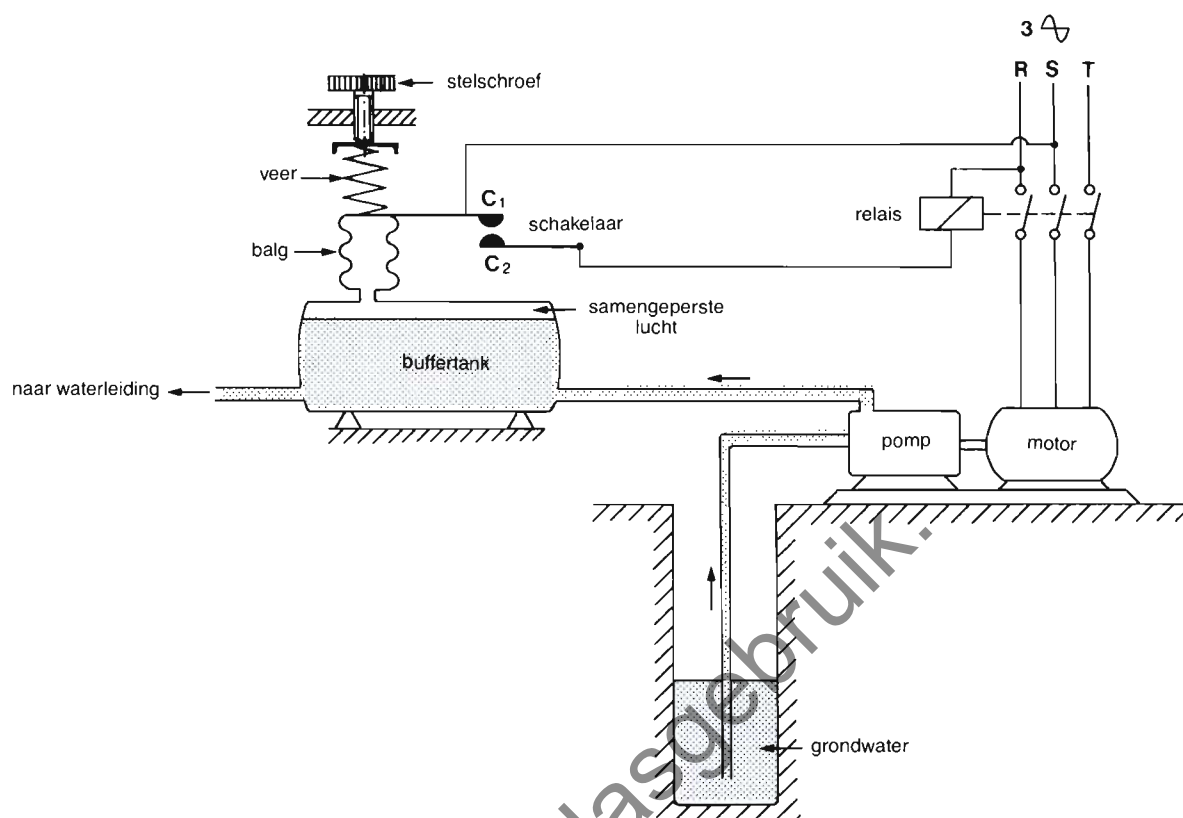


Fig. 6.3. Installatie voor eigen waterleiding in een huis.

Op afgelegen plaatsen waar nog geen waterleiding gelegd werd, moeten de bewoners zelf voor hun watervoorziening zorgen. Hiervoor wordt een buis in de grond geheid tot het niveau van het grondwater. Zie fig. 6.3. Met een zuigerpomp wordt het water opgezogen. Dit water kan niet dadelijk in de waterleiding gestuwd worden, maar wordt eerst in een buffertank gepompt. De lucht boven het water wordt samengeperst en zorgt voor een redelijk constante druk op het water dat vanuit de tank in de leidingen verdeeld wordt. Als de tank voldoende groot is, dan zullen veranderingen van het waterdebiet in de afvoer, op de druk geen te grote schommelingen veroorzaken.

De gesloten regelkring moet er nu voor zorgen, dat de druk en dus ook het waterniveau in de tank, zich steeds in een zone tussen twee uiterste waarden bevinden.

De druk wordt gemeten door een balg of door een membraan. Aan deze balg is een contact C_1 van een schakelaar bevestigd terwijl contact C_2 het vast contact is. Het contact C_1 wordt op zijn plaats gehouden door het evenwicht tussen de druk in de tank en de tegenwerking van een veer. Met een stelschroef kan de veer en dus ook het contact C_1 verplaatst worden, zodat hiermee de gewenste waarde ingesteld kan worden. De schakelaar bedient via een relais een driefasenmotor die de zuigerpomp aandrijft.

Stel dat er geen water wordt afgenomen en de druk is ver genoeg gedaald zodat de schakelaar gesloten is. De motor draait en water wordt in de tank gepompt zodat de druk stijgt. Na een tijd zal de druk ver genoeg zijn toegenomen zodat de schakelaar plots openspringt en de motor uitvalt. Wordt er nu water afgenomen, dan zal de druk dalen tot onder een bepaald niveau waarbij de schakelaar terug inschakelt en er opnieuw water in de tank gepompt wordt.

Opdat de motor niet te dikwijls in- en uitgeschakeld wordt, zal ook hier een hysteresis ingebouwd zijn. In dergelijke installaties wordt dit meestal opgelost met een instelbaar springveer-mechanisme dat in deze figuur niet getekend is. De in- en uitschakeldruk zijn meestal instelbaar in de buurt van $1,5$ tot 2 kg/cm^2 .

3. Niveauregeling in opslagtank

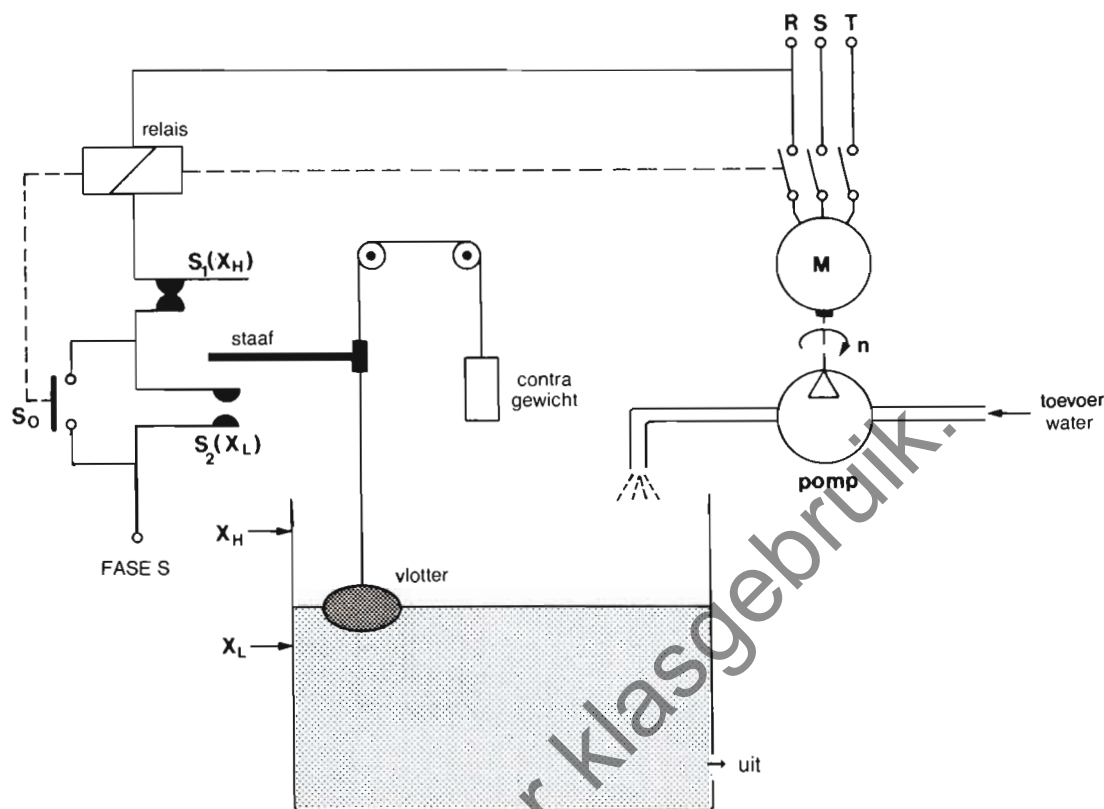


Fig. 6.4 Regeling van de waterstand in een tank, met aan/uit-regelaar met hysteresis.

Een eenvoudige gesloten regelkring zien we in fig. 6.4 waar het de bedoeling is de waterstand tussen twee gemakkelijk in te stellen niveaus constant te houden.

De waterstand wordt gemeten door een vlotter. De vlotter hangt in evenwicht aan een kabel via een contragewicht. Aan deze kabel is een staaf bevestigd die een normaal open contact S_2 kan sluiten en een normaal gesloten contact S_1 kan openen. Via een relais wordt een motor M aan- en uitgeschakeld, waardoor op zijn beurt een pomp P in- en uit bedrijf wordt gesteld.

Daalt het waterniveau tot beneden het niveau X_L dan wordt de schakelaar S_2 door de staaf gesloten en de motor zet de pomp in werking. Het overneemcontact S_0 van het relais gaat eveneens dicht. Als dus iets later het niveau terug stijgt en het contact S_2 weer geopend wordt, dan blijft de motor voorlopig draaien omdat het overneemcontact S_0 gesloten blijft.

Stijgt het waterniveau tot boven X_H dan wordt de schakelaar S_1 geopend. De schakelaar staat in serie met het relais, zodat dit uitvalt. De motor en de pomp worden nu uitgeschakeld. Het overneemcontact S_0 gaat terug in de open toestand. De motor kan nu enkel terug ingeschakeld worden als het waterniveau opnieuw onder X_L komt.

Hier zien we dat op een vrij eenvoudige manier de hysteresis van de aan/uit-regelaar veranderd kan worden. Door de schakelaars S_1 en S_2 verder van elkaar te plaatsen vergroot de hysteresis, door ze korter bij elkaar te plaatsen verkleint de hysteresisband. Door de globale positie van beide schakelaars te verzetten kan de gewenste waarde ingesteld worden.

4. Drukregeling in vat van luchtcompressor

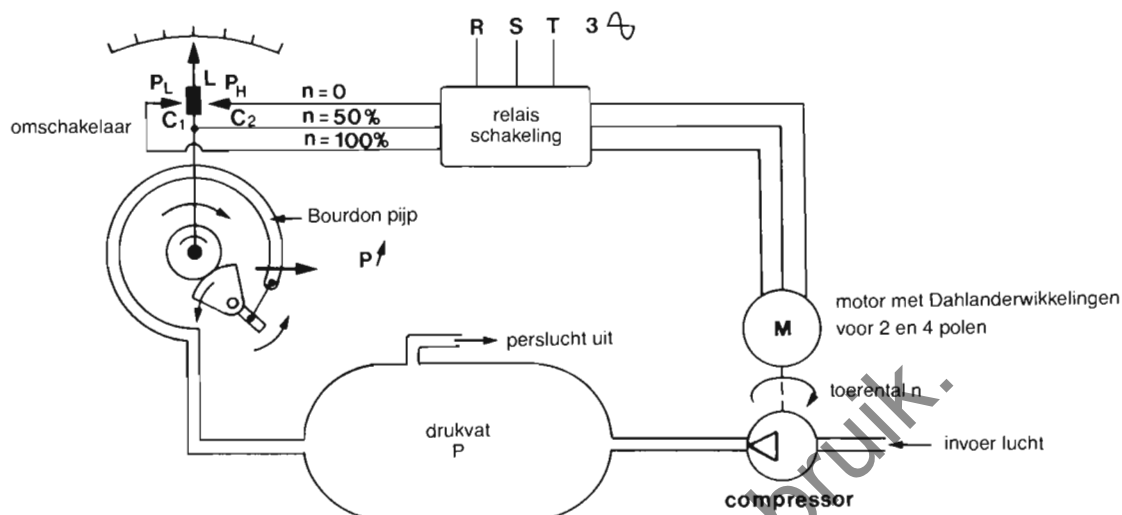


Fig. 6.5 Driestandenregeling om de luchtdruk in een compressorvat constant te houden.

We kennen allemaal de klassieke luchtcompressors die voor talrijke karweitjes kunnen gebruikt worden, zoals: spuitverven, hoge druk reiniging, persluchtvoeding voor gereedschappen, enz.

De lucht wordt met een pomp aangezogen en in een drukvat gestuwd. Het drukvat zelf dient als opvangcapaciteit. Hoe groter het drukvat, des te groter is de capaciteit en des te meer debiet kan afgenomen worden zonder dat de druk te snel zal dalen. Het constant blijven van de druk is in veel toepassingen belangrijk voor de kwaliteit van het uitgevoerde werk zoals bij het spuitverven.

Een klassieke aan/uit-regelaar kan er dan voor zorgen dat bij een bepaalde druk P_H , de pomp uitgeschakeld wordt, en als de druk beneden een waarde P_L komt, zal de pomp volledig ingeschakeld worden. In dit geval spreken we van een twee-standen aan/uit-regelaar, zoals we dit tot nu toe in al onze voorbeelden besproken hebben. Hier wordt een drie-standen regelaar gebruikt waardoor de regeling iets verbeterd wordt.

De druk in het vat wordt gemeten met een Bourdonpijp. Als de druk zich in de zone van de gewenste waarde bevindt, staat de loper L van de omschakelaar in de middenstand tussen de contacten C_1 en C_2 . Zoals in fig. 6.5 is afgebeeld. De relais schakeling zorgt er voor dat de polen van de asynchrone motor M zo gekozen zijn, dat deze en dus ook de pomp P op 50% van zijn nominaal toerental draait. De luchttoevoer per seconde is dan 50% van de nominale waarde. Als het afvoerdebiet van de lucht eveneens in die orde ligt, zal de druk in die zone tamelijk constant blijven.

Wordt de luchtafvoer verminderd dan wordt de druk in de ketel groter en zal de loper L contact maken met C_2 . In de relais schakeling wordt dan de motor uitgeschakeld. Er wordt geen lucht meer via de compressor in het drukvat geperst.

Wordt het debiet van de afgevoerde lucht groter dan zal de druk in de ketel dalen en zal de loper contact maken met C_1 . De relais schakeling zal het aantal polen in de motor op de helft instellen zodat het toerental op de nominale waarde staat en de luchttoevoer gelijk is aan 100%.

5. Spanningsregeling in een auto

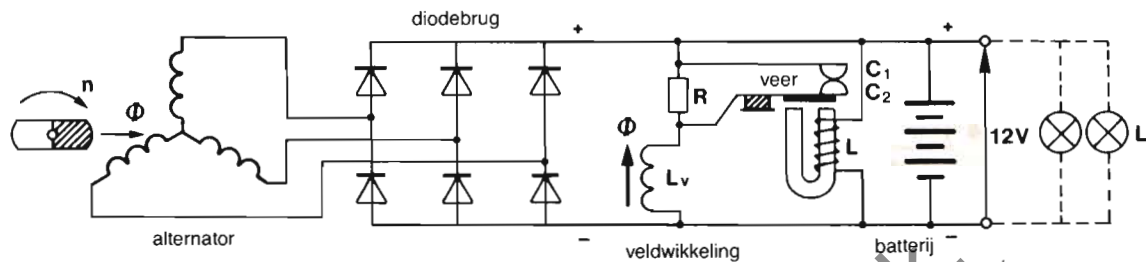


Fig. 6.6 Aan-uit spanningsregeling in een auto.

De accuspanning wordt voortdurend tijdens het rijden bijgeladen door de alternator. Via een riemoverbrenging wordt de alternator aangedreven door de as van de motor. De geproduceerde wisselspanning wordt door de dioden gelijkgericht, zodat een gelijkstroom de accu oplaadt. De spanning van de alternator stijgt en daalt tijdens het stijgen en dalen van het toerental. Omdat het toerental van de motor, volgens de omstandigheden van het rijden steeds verandert zal de spanning van de alternator ook veranderen. Vooral de verlichting zal hiervan zichtbaar hinder ondervinden.

De constant te houden spanning wordt in fig. 6.6 gemeten door een spoel L die parallel aan de batterij ligt. Het magnetisch veld van de spoel kan een opgespannen bladveertje aantrekken. Hieraan is het contact C_2 van de schakelaar bevestigd. De mechanische voorspanning van het bladveertje bepaalt de gewenste waarde.

Ligt de batterijspanning onder deze gewenste waarde, dan wordt het bladveertje niet aangetrokken en de contacten C_1 , C_2 zijn gesloten. Hierdoor wordt een weerstand R , in serie met de veldwindingen L_v van de alternator, kortgesloten. De stroom door deze windingen bepaalt de sterkte van het magnetisch veld in het anker en ook de grootte van de geïnduceerde spanning in de statorwindingen. Er vloeit dus nu een grote stroom door de veldwinding, zodat de opgewekte spanning groot is, de accuspanning stijgt.

Wordt de spanning te groot, dan zal de spoel het bladveertje aantrekken zodat de contacten C_1 , C_2 geopend worden. Hierdoor komt de weerstand R in serie te staan met de veldwinding, zodat de stroom erdoor kleiner wordt en de opgewekte spanning daalt.

Het aantrekken en afvallen van het bladveertje hangt af van de aantrekspanning en afvalspanning van de spoel. We noemen dit de hysteresis van de aan/uit-regelaar. De spanning zal dus in deze hysteresisband op en neer schommelen. We weten uit ervaring dat deze band voldoende klein is, aangezien we de lichtsterkte van de lampen nauwelijks zien veranderen tijdens het rijden.

Door deze smalle hysteresisband, gaan de contacten zeer snel open en dicht. De frequentie van het schakelen ligt bij tientallen tot een honderdtal keren per seconde. De gemiddelde laadspanning ligt dan rond 14 volt.

6. Elektronische aan/uit-regelaar

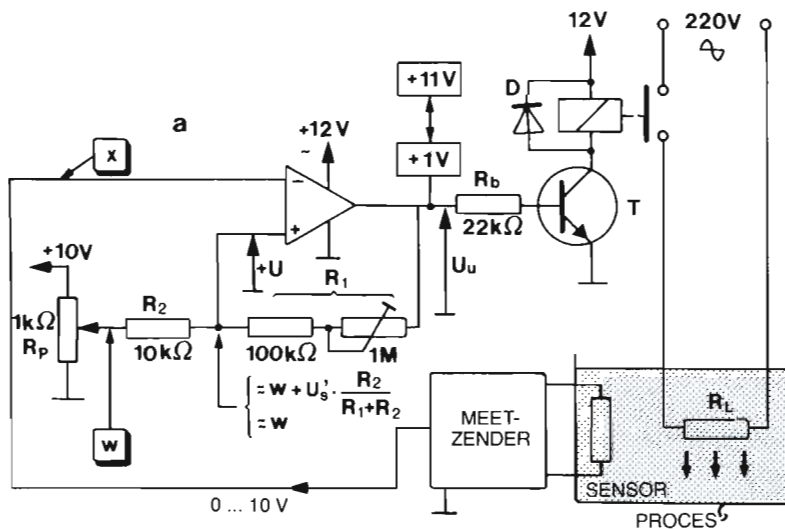


Fig. 6.7 Elektronische aan/uit-regelaar met instelbare hysteresis.

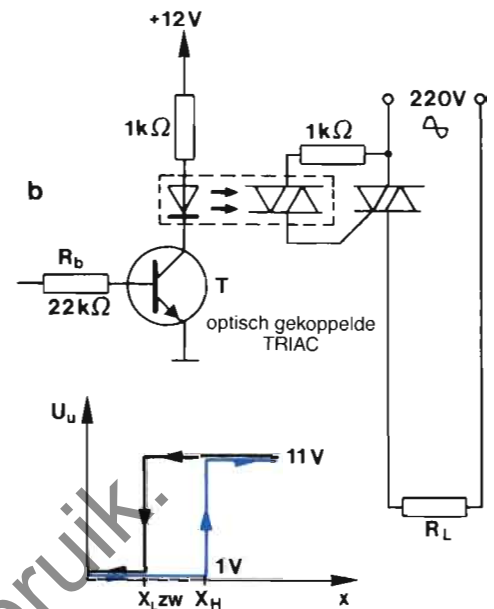


Fig. 6.8 Hysteresislus van de aan/uit-regelaar

Op blz. 13 hebben we reeds een elektronische aan/uit-regelaar besproken in een temperatuurregeling. We willen hier de schakeling uitbreiden met het inbouwen van een hysteresis. De temperatuur wordt gemeten met een sensor, bijvoorbeeld een NTC of platina weerstand, en door de meetzender omgezet naar een standaardsignaal van 0-10 volt. In een niet gestandaardiseerd proces kan het ook eenvoudiger door de sensor direct in een spanningsdelers op te nemen zoals in fig. 1.8. De gemeten spanning x komt op de (-) ingang van de opamp en wordt vergeleken met de spanning op de (+) ingang. Is de proceswaarde x lager dan $U(+)$, gaat de uitgang hoog en treedt de transistor in geleiding. Het relais wordt bekrachtigd en de verwarming wordt ingeschakeld. Is x hoger dan $U(+)$, dan wordt de uitgang laag zodat de transistor spert, het relais valt af en de verwarming staat uit.

Waar in fig. 1.8 door de proceswaarde x slechts één omklappunt gezien wordt, zijn er in fig. 6.7 twee omklappunten ingebouwd. Het is de bedoeling een hysteresis te bereiken, zoals het magneetje en het springveertje dit doen in de voorheen besproken aan/uit-regelaars.

Als de proceswaarde x voldoende laag is, dan is de uitgang van de opamp hoog of $U_o = +11$ volt. Via de spanningsdeler R_1 , R_2 wordt de gewenste waarde w iets opgetrokken. Is R_2 voldoende klein t.o.v. R_1 , en R_p voldoende klein t.o.v. R_2 dan is in eerste benadering de spanning op de niet inverterende ingang: $X_H = w + U_o \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$. De proceswaarde x moet dus over dit niveau stijgen om de schakeling te doen omschakelen en de verwarming uit te schakelen. We noemen dit: het hoog omschakelniveau van de aan/uit-regelaar.

Is de proceswaarde x groter dan X_H dan staat de uitgang van de opamp laag of $U'' = +1$ volt. Door de keuze van de weerstanden ($R_2 \ll R_1$ en $R_P \ll R_2$) is de spanning op de (+) ingang van de opamp praktisch gelijk aan de gewenste waarde w . Daalt nu x , dan moet deze onder de waarde w zakken waardoor de uitgang van de opamp terug hoog gaat, en de verwarming weer ingeschakeld wordt ($X_L = w$). Het verband tussen de uitgang U_i van de opamp en de ingang x is in fig. 6.8 voorgesteld.

Het voordeel van dit elektronisch systeem is, dat de band van de hysteresis nauwkeurig kan worden ingesteld, door R_f regelbaar te maken. De sturing van de verwarmingsweerstand kan ook gebeuren met een optisch gekoppelde triac, in plaats van het elektromechanisch relais. Fig. 6.7.b geeft hiervan een uitvoering.

We hebben nu voldoende voorbeelden aangehaald om een idee te hebben met welke uiteenlopende technologievormen aan/uit-regelaars kunnen opgebouwd worden. Ook hebben we de hysteresis bij deze regelaars leren kennen. We zullen in het volgende gedeelte de theorie van de gesloten kring bestuderen.

7. Aan/uit-regelaar zonder hysteresis 1ste-orde-proces

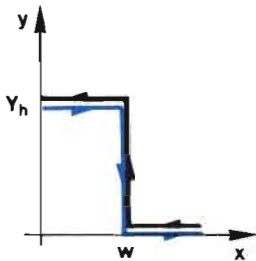


Fig. 6.9 Aan/uit-regelaar zonder hysteresis.

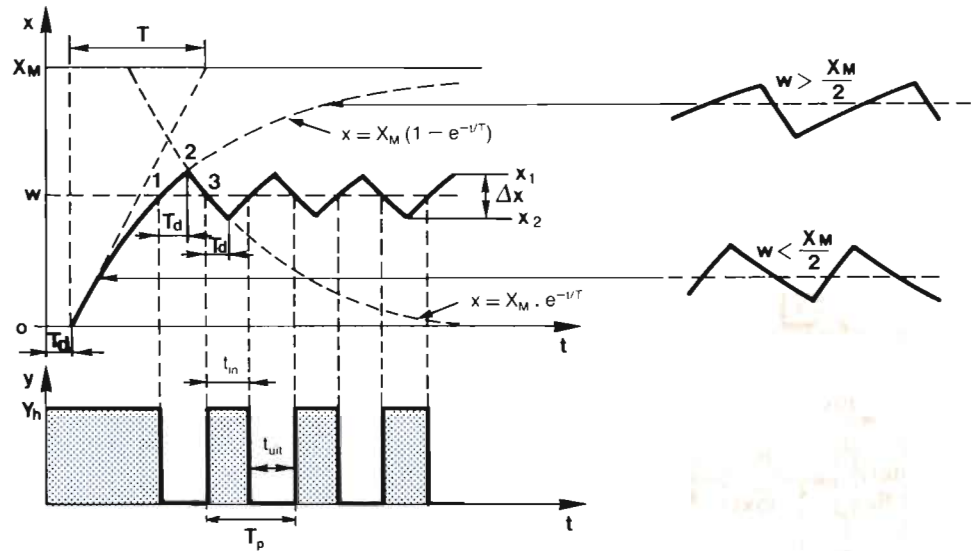


Fig. 6.10 Verloop van de proceswaarde van aan/uit-regelaar zonder hysteresis

Het verband tussen ingang x en uitgang y van de aan/uit-regelaar zonder hysteresis is afgebeeld in fig. 6.9. We beschouwen een gesloten regelketen met een aan/uit-regelaar en een eerste-orde-proces.

Dit proces wordt gekenmerkt door zijn tijdconstante T , zijn dode tijd T_d en zijn volledig meetbereik X_M . Het is de bedoeling na te gaan hoe de proceswaarde x op en neer schommelt en hoe de amplitude en de periode van de beweging afhankelijk is van de procesparameters T , T_d , X_M .

In fig. 6.10 is het verloop van de proceswaarde x getekend nadat op tijdstip $t = 0$ de kring gesloten wordt. Een goed voorbeeld is een drukregeling in een tank of een temperatuurregeling van een vloeistof met directe invoer van stoom. Na de dode tijd T_d start x volgens het typisch exponentieel verloop van een eerste-orde-proces. Men kan aantonen dat $x = f(t)$ als volgt geschreven kan worden:

$$x = X_M (1 - e^{-t/T})$$

Als x in punt 1 gelijk wordt aan de ingestelde waarde w dan valt de uitgang y van de regelaar op nul. Dit heeft pas zijn weerslag op het proces na verloop van de dode tijd T_d . Gedurende deze dode tijd blijft de proceswaarde nog iets aangroeien. Na de dode tijd (2) daalt x weer, volgens een exponentiële functie eigen aan een proces van eerste orde. De relatie $x = f(t)$ ziet er dan uit als volgt:

$$x = X_M \cdot e^{-t/T}$$

Daalt x nu tot juist onder de waarde w (3) dan schakelt de regelaar de toevoer in. Het proces reageert hierop pas na de dode tijd, en dan zal de temperatuur gaan stijgen. We zien dat de proceswaarde tussen twee uitersten x_1 en x_2 zal schommelen. Deze beweging is gekenmerkt door een amplitude $\Delta x = x_1 - x_2$ en een periode T_p .

In verband met **de vorm van de kurve** kunnen we als volgt redeneren:

1. Als de ingestelde waarde w in het midden van X_M ligt, dan is de aan-tijd t_{in} van de regelaar even groot als de uit-tijd t_{uit} .
2. Ligt w lager dan $X_M/2$ dan is er voor de lage waarde van w te veel toevoervermogen zodat x sneller stijgt dan daalt.
3. Ligt w hoger dan $X_M/2$ dan zal voor de hoge waarde van w , de proceswaarde x sneller dalen dan stijgen.

In verband met **amplitude en periode** kunnen we zeggen:

Hoe kleiner de dode tijd, des te sneller zal het proces reageren op het omschakelen van de regelaar van 0 naar Y_h . Hierdoor wordt de amplitude en de periode van het schakelen kleiner. Bij een verwaarloosbare dode tijd, zal de amplitude praktisch nul zijn, maar de periode is zeer klein of de schakelfrequentie zeer groot. De levensduur van de schakelende contacten wordt dus nadelig beïnvloed.

8. Amplitude en periode (aan/uit-regelaar zonder hyst. + 1ste orde-proces)

Zoals reeds is aangehaald zal de **amplitude** Δx des te kleiner worden naarmate de dode tijd T_d van het proces kleiner is. Uit berekeningen volgt echter dat de verhouding dode tijd tot tijdconstante bepalend is voor de amplitude. Hoe kleiner de verhouding T_d/T des te kleiner wordt Δx . Het is inderdaad zo dat een dode tijd $T_d = 0,1 T$ een veel kleinere invloed heeft dan een dode tijd $T_d = 0,5 T$. Het is dus de relatieve waarde van dode tijd tot tijdconstante die een grote rol speelt.

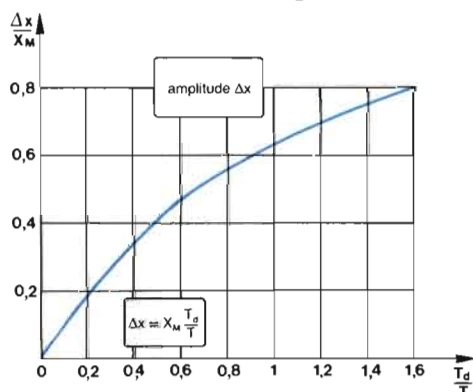


Fig. 6.11 Bepalen van amplitude Δx van de proceswaarde

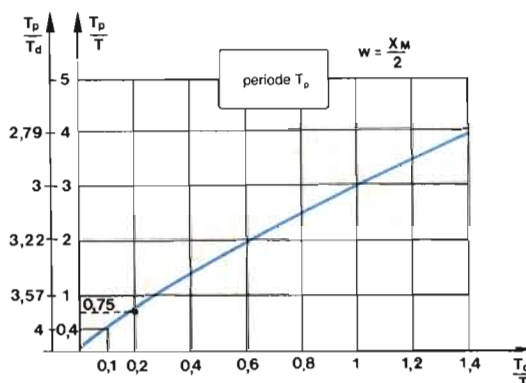


Fig. 6.12 Bepalen van de periode T_p van de proceswaarde

Uit het verloop van de proceswaarde x in fig. 6.10 volgt dat de toe- en afname volgens een exponentiële functie gebeurt. Om de amplitude Δx te berekenen moet men de grootte van x_1 en x_2 bepalen met de klassieke exponentiële functies. We besparen ons de berekeningen en stellen ons tevreden met het resultaat onder de vorm van een grafiek in fig. 6.11. Hierin is de verhouding $\Delta x/X_M$ uitgezet in functie van de verhouding T_d/T .

Voorbeeld 1

Stel een proces heeft een dode tijd van 4 minuten. De tijdconstante bedraagt 20 minuten. Bij verstelling van 0 tot Y_h zou de temperatuur veranderen van 20°C tot 100°C. Hoe groot is de amplitude van de proceswaarde?

Oplossing:

We berekenen $T_d/T = 4/20 = 0,2$.

In de grafiek van fig. 6.11 vinden we bij deze waarde: $\Delta x/X_M = 0,2$. De amplitude is dus 20% van de hele meetwaarde. Aangezien X_M gelijk is aan $100 - 20 = 80^\circ\text{C}$, is de amplitude $\Delta x = 0,2 \cdot 80 = 16^\circ\text{C}$.

Als de verhouding T_d/T voldoende klein is ($< 0,2$) dan verloopt de grafiek in fig. 6.11 praktisch lineair terwijl:

$$\frac{\Delta x}{X_M} = \frac{T_d}{T} \quad \text{of} \quad \Delta x = X_M \frac{T_d}{T}$$

Wat de **periode** T_p betreft is er eveneens een afhankelijkheid van de plaats van de ingestelde waarde w . Ligt w in de helft van het meetbereik X_M zoals in fig. 6.10 dan is de periode minimaal. Voor alle posities van de instelwaarde w boven $X_M/2$ en beneden $X_M/2$ zal de periode iets groter zijn.

In industriële regelkringen zal de set-point waarde w meestal rond het midden van het meetbereik X_M liggen. In dat geval is de grafiek van fig. 6.12 handig om te gebruiken.

Voorbeeld 2

We gebruiken de numerieke gegevens van voorbeeld 1. Bereken de periode T_p als $T_d/T = 0,2$ of $T = 5 T_d$

Oplossing:

Als $T_d/T = 0,2$ dan leiden we uit fig. 6.12 af: $T_p/T = 0,75$. Vervangen we hierin $T = 5 \cdot T_d$ dan kunnen we de periode ook bepalen in functie van T_d .

Inderdaad, $T_p = 5 \cdot 0,75 \cdot T_d = 3,75 \cdot T_d = 3,75 \cdot 4 = 15$ minuten.

In veel boeken wordt de periode in functie van de dode tijd afgerond tot de formule:

$$T_p \approx 4 \cdot T_d$$

9. Belang van hysteresis

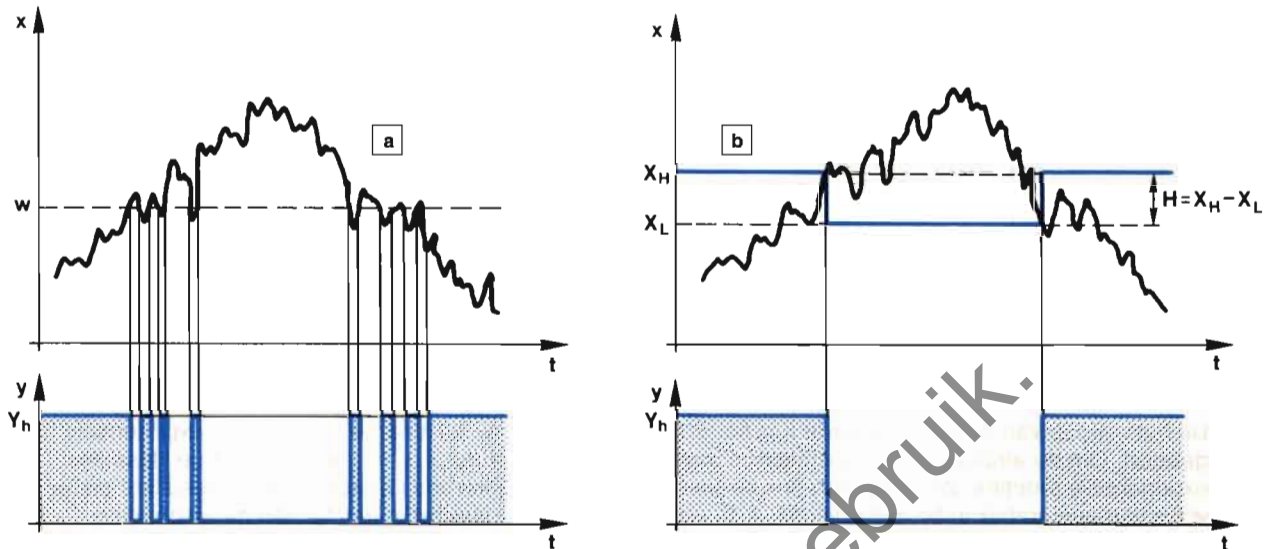


Fig. 6.13 Vergelijken van aan/uit regeling zonder hysteresis en met hysteresis

Zoals hiervoor reeds wordt aangehaald, zal een aan/uit-regelaar in een proces met kleine dode tijd ten opzichte van de tijdconstante, een kleine schakelperiode of een grote schakelfrequentie opleveren. Hoewel gelijktijdig een kleine amplitude ontstaat, en dit dus een voordeel is, is de hoge schakelfrequentie niet goed voor de **levensduur** van de schakelende contacten. Ook het te dikwijls in-uit schakelen van zware mechanische toestellen zoals kleppen, en elektrische motoren moet vermeden worden. Dit is dus een reden om de schakelfrequentie relatief laag te houden, of de periode hoog. Dit kan, door in plaats van één omschakelpunt, voor twee omschakelpunten te zorgen.

Maar er is nog een andere reden om een hysteresis in te bouwen. De fysische grootte zal in veel gevallen niet mooi continu stijgen of dalen. In veel gevallen zit er een willekeurige verandering op de beweging, die we **ruis** noemen. Bij een temperatuurregeling in een vloeistof zal dit ontstaan door wervelingen in de vloeistof, waardoor de temperatuur tijdens het stijgen of dalen nog grillige bewegingen uitvoert.

Is er slechts één omschakelpunt, dan zal tijdens de doorgang door de instelwaarde w , de proceswaarde verschillende keren de uitgang van de regelaar doen omslaan, alvorens definitief de andere toestand aan te nemen. Zie fig. 6.13.a. Bij een relais zal dit een kleppen van de contacten veroorzaken. Wordt een zwaar mechanisch toestel gestuurd dan is dit snel heen en weer schakelen niet gewenst.

Bij een aan-uit regelaar met hysteresis zijn er twee omschakelpunten, X_H en X_L . Als bijvoorbeeld de proceswaarde x laag is, en stijgt, omdat maximum vermogen in het proces toegevoerd wordt, is in de schakeling het hoog omklapniveau in werking. Wordt x gelijk en groter dan x_H , dan wordt de uitgang van de regelaar nul, maar gelijktijdig wordt het laag omklapniveau X_L werkzaam. De proceswaarde die nu nog door X_H snijdt, doet de uitgang niet meer veranderen. Als x nu terug daalt, zal de uitgang hoog gaan als x gelijk en kleiner wordt dan X_L . Dadelijk wordt dan het hoog omklapniveau ingesteld. Dit verloop is voorgesteld in fig. 6.13.b

Door te zorgen dat de hysteresisband $H = X_H - X_L$ groter is dan de top tot top waarde van de ruis, zal tijdens de overgang het relaiskleppen voorkomen worden.

10. Aan/uit-regelaar met hysteresis

(+ 1^{ste} orde proces zonder dode tijd)

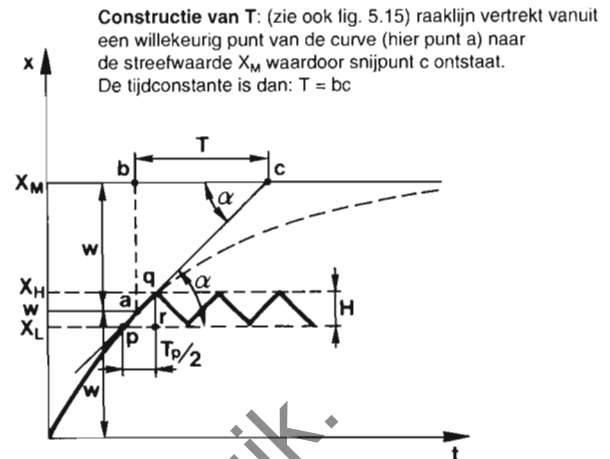
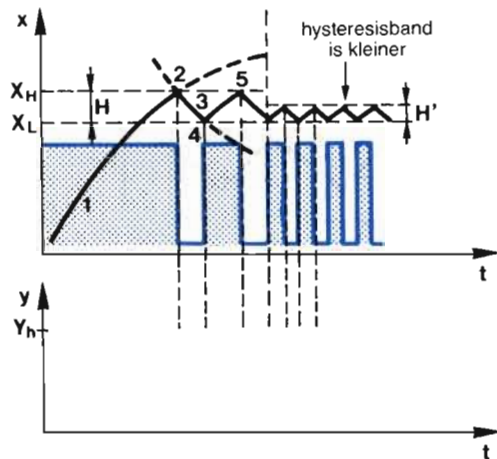


Fig. 6.14 Aan/uit-regelaar met hysteresis + proces zonder dode tijd Fig. 6.15 Grafisch de periode bepalen

In fig. 6.14 beschouwen we een eerste-orde-proces waarbij de dode tijd van het proces zeer klein en dus verwaarloosbaar is. Het proces is nu gekenmerkt door zijn tijdconstante T ; de regelaar door zijn hysteresis H .

Als $y = 0$, dan kan de meetomvormer ervoor zorgen dat de fysische grootheid omgezet wordt naar een waarde $x = 0$. We starten regelaar en proces in die situatie, zodat door de lage waarde van x , de uitgang van de regelaar dadelijk op Y_h springt, zodat maximum vermogen naar het proces wordt toegevoerd. De proceswaarde x , bijvoorbeeld de temperatuur gaat volgens een exponentiële functie stijgen. Dit is het gebied 1 in fig. 6.14.

Zodra het hoog omklapniveau X_H bereikt wordt, zal bij een bimetaal, de spankracht de aantrekking van het magneetje overwinnen, zodat de contacten openspringen. De vermogentoevoer wordt gestopt in punt 2. Omdat de dode tijd verwaarloosbaar klein is, reageert het proces hierop onmiddellijk en de proceswaarde zal, weer volgens een exponentiële functie dalen zoals het gebied 3 in fig. 6.14 weergeeft.

Omdat het bimetaal de aantrekking van het magneetje moet overwinnen, zijn de contacten ver opengesprongen. Hierdoor moet de temperatuur over een zekere afstand dalen vooraleer de contacten zo kort genaderd zijn dat het magneetje ze plots weer doet sluiten. De proceswaarde waarbij dit gebeurt, vormt het laag omklapniveau X_L in punt 4. Als het vermogen weer volledig ingeschakeld wordt, zal de proceswaarde x hierop dadelijk reageren en stijgen tot punt 5 enz...

De amplitude zal dus steeds gelijk zijn aan de hysteresisband H . Wordt de hysteresis kleiner gemaakt, dan zal de amplitude van de oscillatie wel kleiner worden, maar de schakelfrequentie vergroot.

Met behulp van fig. 6.15 kan men de periode benaderend berekenen. Hiertoe moeten de volgende voorwaarden gerealiseerd zijn: de gewenste waarde w moet ongeveer in de helft van het meetbereik X_M liggen, en de hysteresis H moet klein zijn t.o.v. X_M . We trekken een raaklijn in het punt a van de aanloopcurve. Deze raaklijn snijdt de lijn X_M in punt c . Hiermee kan de tijdconstante $T = bc$ bepaald worden. Als nu de oscillerende beweging van x in eerste benadering door rechte lijnen voorgesteld wordt, dan zien we twee gelijkvormige driehoeken ontstaan: abc en pqr . Hieruit volgt:

$$\frac{H}{T_p/2} = \frac{w}{T} \quad \text{zodat:} \quad T_p = 2T \cdot \frac{H}{w}$$

11. Aan/uit-regelaar met hysteresis

(+1^e orde proces met dode tijd)

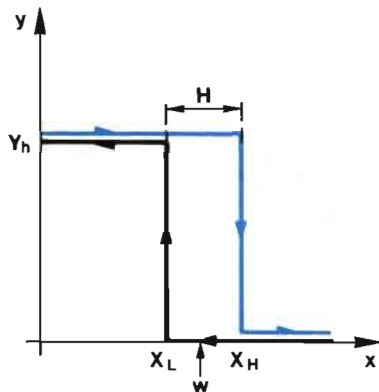


Fig. 6.16 Verband tussen ingang x en uitgang y van de regelaar.

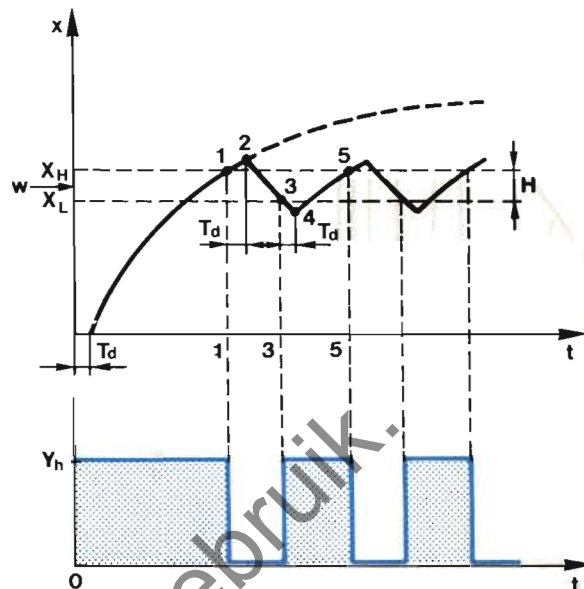


Fig. 6.17 Verloop proceswaarde met dode tijd en aan/uit-regelaar met hysteresis

De meeste aan/uit-regelaars zijn voorzien van een hysteresis. In de elektronische uitvoeringen is deze hysteresis eenvoudig en nauwkeurig in te stellen. In fig. 6.16 is het verband voorgesteld tussen y en x van de regelaar.

We beschouwen in fig. 6.17 het gedrag van een proces van eerste orde met tijdconstante T en een dode tijd T_d .

Wordt de gesloten kring gestart bij $x = 0$ en $y = \max = Y_h$, dan zal het hoog omklapniveau X_H ingesteld zijn. In het geval van een bimetaal moet de spankracht door het stijgen van de temperatuur de aantrekkingskracht van het magneetje overwinnen, opdat het contact zou openspringen. In het geval van een elektronische regelaar moet de spanning x een hoog drempelniveau overschrijden om een comparator te doen omklappen.

De regelaar zal dus uitschakelen als $x > X_H$ of punt 1 in fig. 6.17. Onmiddellijk daarna wordt in de regelaar het ander omklapniveau X_L ingeschakeld. Bij het bimetaalsysteem zijn de contacten nu te ver geopend, door de invloed van het magneetje bij het openspringen. De temperatuur moet dus over een zekere afstand terug dalen om de contacten weer te sluiten. In het elektronisch systeem wordt de omgeklapte toestand van de comparator gebruikt om een nieuw omschakelniveau X_L in te stellen. Het proces reageert hierop niet onmiddellijk, wel na de dode tijd T_d in punt 2.

Dan zal de proceswaarde x terug dalen. Het vermogen wordt opnieuw ingeschakeld als $x < X_L$ hetgeen op ogenblik 3 gebeurt. Dadelijk wordt in de regelaar het hoog omklapniveau werkzaam. Bij de bimetaalregelaar zijn de contacten nu gesloten en worden nog extra vastgehouden door het magneetje. De temperatuur moet nu over een zekere afstand stijgen om het bimetaal te doen plooiën zodat de aantrekkingskracht van het magneetje overwonnen wordt. In het elektronisch systeem is door het omklappen van de comparator een nieuw omklapniveau X_H ingesteld. Het stijgen van de proceswaarde gebeurt niet direct na het inschakelen van het vermogen, maar slechts na de dode tijd T_d . Vandaar dat het ogenblik $t_4 = t_3 + T_d$.

De aanwezigheid van de hysteresis heeft twee gevolgen:

1. De amplitude van de beweging is minstens gelijk aan de hysteresis plus het gedeelte dat erbij komt door de dode tijd. Bij een zeer kleine dode tijd zal de amplitude gelijk worden aan de hysteresis H .
2. De periode kan nu niet onbeperkt klein worden of de frequentie kan niet onbeperkt groot worden. Bij zeer kleine dode tijden wordt de periode nog altijd begrensd door de tijd nodig om de hysteresis heen en weer te doorlopen.

12. Amplitude bij aan/uit-regelaar met hysteresis

(1^e orde proces met dode tijd)

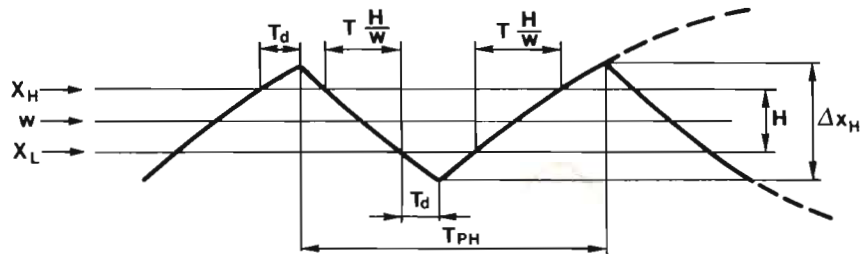


Fig. 6.18 Amplitude en periode van de proceswaarde

In fig. 6.18 beschouwen we het verloop van de proceswaarde van een eerste-orde-systeem met dode tijd T_d waarbij de aan/uit-regeling een hysteresis H bezit. Uit de figuur volgt dat de amplitude Δx_H des te kleiner wordt naarmate de dode tijd van het proces kleiner is.

Is het proces een ideaal eerste-orde-systeem, dan kunnen de exponentiële functies gebruikt worden om de amplitude Δx_H en de periode T_{PH} te berekenen in deze gesloten regelkring met hysteresis. De berekeningen zijn uiteraard iets ingewikkelder. Ook hier gaan we niet in op de berekeningen zelf en we stellen ons tevreden met de resultaten.

De onderstaande formules zijn vereenvoudigde uitdrukkingen die gebruikt worden om de orde van grootte van amplitude en periode te bepalen. De volgende voorwaarden begunstigen de nauwkeurigheid.

- De hysteresis H moet relatief klein blijven t.o.v. het totale meetgebied X_M . Meestal is dit trouwens minder dan 10%. In fig. 6.17 is de hysteresis overdreven getekend voor de duidelijkheid van de tekening.
- De gewenste waarde moet ongeveer in het midden liggen van het meetbereik X_M , dus $w = X_M/2$ of $X_M = 2w$
- De verhouding T_d/T moet relatief klein zijn ($< 0,2$)

Gelukkig zijn de bovenste voorwaarden in de meeste praktische processen voldoende benaderd, zodat het hanteren van de formules een bevredigende nauwkeurigheid oplevert.

De amplitude van de beweging in deze regelkring met hysteresis Δx_H kan gelijk gesteld worden aan deze zonder hysteresis Δx plus de hysteresis H .

Vandaar de volgende uitdrukking: $\Delta x_H \approx \Delta x + H$

De waarde van Δx kan dan bepaald worden met de grafiek van fig. 6.11 of met de uitdrukking:

$$\Delta x \approx X_M \cdot \frac{T_d}{T}$$

Als $w = \frac{X_M}{2}$ dan wordt: $\Delta x = 2w \frac{T_d}{T}$

Voor de periode T_p hebben we bij voldoende kleine waarden van T_d/T in het geval zonder hysteresis en met dode tijd benaderend gevonden: $T_p = 4 \cdot T_d$. In het geval met hysteresis is de periode natuurlijk steeds iets groter, omdat er tijd nodig is om de hysteresisband heen en weer te doorlopen.

In par. 10 werd aangetoond dat: $T_p = 2T \cdot \frac{H}{w}$ (zonder dode tijd en met hysteresis)

Zo wordt voor de totale periode met hysteresis en dode tijd gevonden:

$$T_{PH} \approx 4T_d + 2T \cdot \frac{H}{w} \quad \text{en als } w = \frac{X_M}{2}: \quad T_{PH} \approx 4T_d + 4T \cdot \frac{H}{X_M}$$

13. Aan/uit-regelaar bij proces van hogere orde

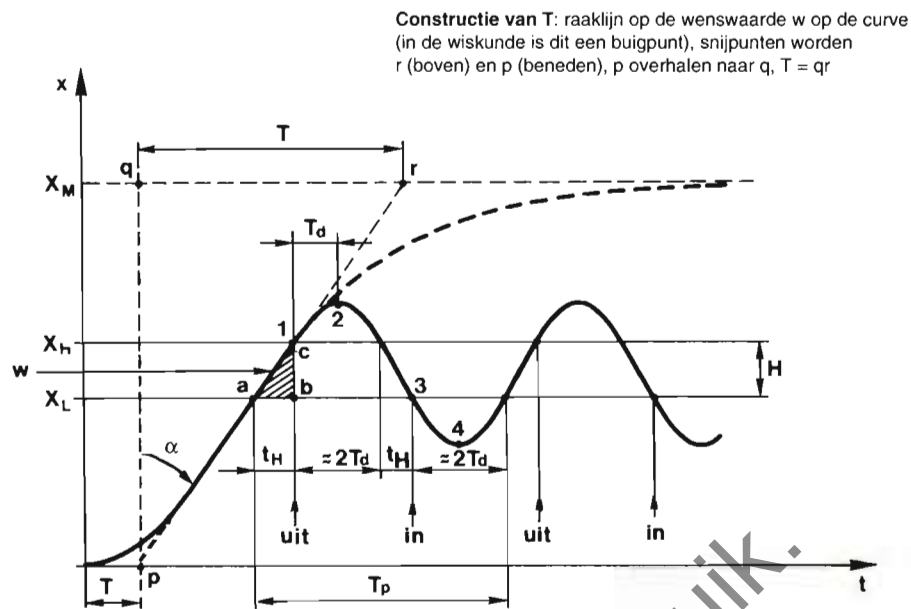


Fig. 6.19 Aan/uit-regeling met hysteresis in een proces van hogere orde.

In ideale processen van eerste orde, zal de overgang van stijgen naar dalen en dalen naar stijgen van de proceswaarde x , plots gebeuren, dus met een bepaalde helling.

In processen van hogere orde zal het procesantwoord op een stapsgang nooit met een bepaalde helling beginnen. De proceswaarde x loopt zacht aan, rakend aan de tijdas. Zelfs de echte dode tijd zit volledig verborgen in dit zacht stijgen van x , zodat deze moeilijk te bepalen is. Dit zacht, en dus zeer traag reageren van het proces dadelijk na een plots verstellen van y , doet zich voor zowel bij de overgang van 0 naar Y_n als van Y_n naar 0. De overgang van stijgen naar dalen, en van dalen naar stijgen zal dus geleidelijk gebeuren.

Als in punt 1 van fig. 6.19 de vermogentoevoer wordt afgesloten, dan zal de proceswaarde daar in het begin niet op reageren. Als de reactie merkbaar wordt zal x minder snel stijgen. Pas wanneer de snelheid van x nul wordt in punt 2 zal x daarna gaan dalen. Men kan stellen dat het proces dan pas reageert op het afsluiten van het vermogen. Ook als in punt 3 het vermogen opnieuw wordt ingeschakeld, zal het proces hierop niet dadelijk reageren. Door de zachte aanlooptreactie van het proces zal x eerst minder snel dalen, tot de snelheid nul wordt, en daarna pas gaan stijgen. In punt 4 kunnen we dus zeggen dat het proces reageert op de stijging van y .

Omdat de echte dode tijd verstopt is in de aanloopcurve, is het berekenen van de te verwachten amplitude en periode veel moeilijker. In ieder geval moeten we, door de trage reactie van het proces, een grotere amplitude verwachten dan in een gelijkaardig proces van eerste orde. Wat de vorm van de beweging betreft, herkennen we bij het dalen en het stijgen de "s"-vorm van het proces, zodat het geheel een quasi sinusoidaal verloop vertoont.

In het geval dat de wenswaarde w zich ongeveer in het midden van het meetbereik X_M bevindt, en als ook het buigpunt in die omgeving ligt, kan men voor de periode een benaderende uitdrukking vinden. We zien dat de driehoeken abc en pqr gelijkvormig zijn.

Hieruit volgt :

$$\frac{H}{t_H} = \frac{2w}{T} \quad \text{of} \quad t_H = T \cdot \frac{H}{2w}$$

Met behulp van fig. 6.19 vindt men voor de totale periode: $T_p \approx t_H + 2T_d + t_H + 2T_d$ of :

$$T_p \approx 4 \cdot T_d + T \cdot \frac{H}{w}$$

14. Vergelijking aan/uit met proportionele regelaar

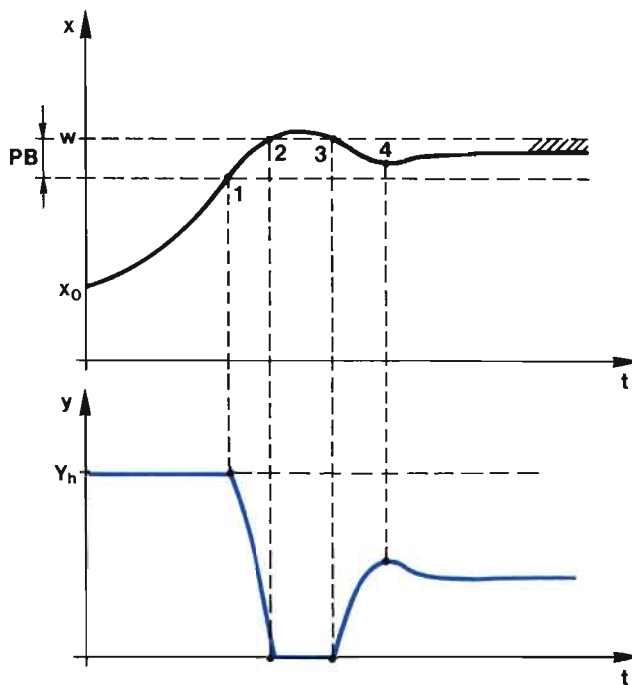


Fig. 6.20 Verloop van x en y bij P-regelaar
proportionele band = $PB = X_p$

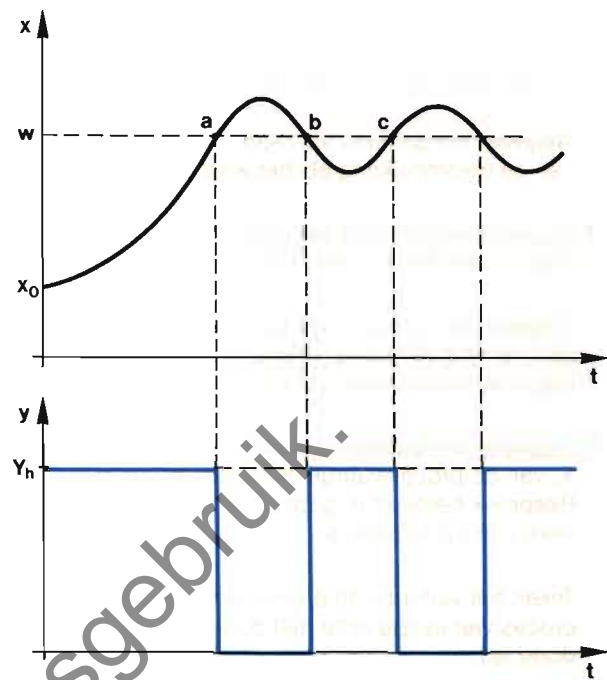


Fig. 6.21 Verloop van x en y bij aan/uit-regelaar

Vroeger hebben we reeds een vergelijking gemaakt tussen beide soorten regelaars (zie op blz. 30). Met de kennis die we nu hebben, willen we hierop even terugkomen. Op blz. 30 zagen we: de proportionele regelaar is een continue regelaar waarvan de uitgang y lineair verloopt met de ingang x , binnen een beperkte zone van x , de proportionele band PB of X_p genoemd.

Stel nogmaals dat we de gesloten kring van een temperatuurregeling starten.

Bij de P-regelaar zal de toevoerenergie maximaal blijven totdat de proceswaarde x , de proportionele band binnendringt. De instelwaarde y wordt dan kleiner, zodat dit de proceswaarde x minder snel doet stijgen.

Dit gebeurt in fig. 6.20 vanaf punt 1. In fig. 6.21 zien we dat bij de aan/uit-regelaar de toevoerenergie vanaf $t = 0$ langer op maximum stand blijft staan, namelijk tot punt a. Het doorschieten van de proceswaarde x zal dus krachtiger zijn.

Als bij de proportionele regelaar de proceswaarde x terug daalt en in punt 3 terug de PB binnendringt, zal de instelwaarde evenredig oplopen met de afwijking $w - x$. Na een tijd zal x terug stijgen, waarna x en y mekaar in een stabiele rustinstelling vasthouden. In deze figuur is de regelaar goed afgesteld op het proces.

Bij de aan/uit-regelaar zal, als x terug onder w daalt, de instelwaarde y volledig op maximum springen, zodat na de invloed van de dode tijd en de vertraging in het proces, x weer krachtig stijgt en op punt c door w gaat.

Besluit:

1. Een goed ingestelde P-regelaar veroorzaakt in de gesloten kring een voorbijgaande oscillerende beweging. Een aan/uit-regelaar blijft oscilleren.
2. Een aan/uit-regelaar kan beschouwd worden als een P-regelaar waarvan de PB herleid werd tot nul.
3. Hoe kleiner de PB van een P-regelaar, (of hoe groter de versterking) des te meer lijkt de P-regelaar op een aan/uit-regelaar, en des te groter is de oscilleer neiging.

15. Opdrachten

1. Teken het principe van een gesloten regelkring met bimetaal en leg de werking van deze constructie uit. Verklaar de aanwezigheid van een permanent magneetje.
2. Gegeven het schema van een drukregeling van water in een waterleiding (fig. 6.3). Bespreek de werking van de gesloten kring als de druk in de ketel stijgt en als de druk daalt.
3. Gegeven het schema van een niveauregeling van water in een opslagtank (fig. 6.4). Bespreek de werking van de gesloten kring als het waterniveau stijgt en als het niveau daalt.
4. Gegeven het schema van een drukregeling in een luchtcompressor. (fig. 6.5) Bespreek de werking van de regeling als de druk stijgt en als de druk daalt.
5. Gegeven het schema van een spanningsregeling in een auto (fig. 6.6) Bespreek de werking van de gesloten regelkring. De volgende thema's moeten aan bod komen: de werking als de spanning stijgt en als de spanning daalt, de hysteresis van de regelaar, de frequentie van het schakelen.
6. Gegeven het schema van een elektronische aan/uit-regelaar. (fig. 6.7) Hoe wordt het hoog omklapniveau x_H van de proceswaarde gerealiseerd, en hoe wordt het laag omklapniveau x_L gerealiseerd? Bespreek hetgeen er gebeurt als x stijgt en groter wordt dan x_H en als x daalt en kleiner wordt dan x_L . Teken de hysteresislus.
7. Teken het verloop van de proceswaarde in een twee-standen aan/uit-regelaar zonder hysteresis, in een proces van eerste orde met dode tijd. Geef ook een verklaring van de curve en bespreek de rol van de dode tijd.
8. Een proces heeft een dode tijd van 4 min. en een tijd-constante van 10 min. Het meetbereik X_M strekt zich uit van 20 tot 200°C. Bepaal de periode T_p en de amplitude Δx van de proceswaarde, als x ongeveer in het midden van het meetbereik ligt. Gebruik hiervoor de figuren 6.11 en 6.12.
9. Waarom kan het nuttig zijn een hysteresis in een aan/uit-regelaar te bouwen?
10. Teken het verloop van de proceswaarde in een twee-standen aan/uit-regeling met hysteresis, in een proces van eerste orde zonder dode tijd. Door wat wordt de amplitude bepaald? Stel de formule op voor de periode als de gewenste waarde zich ongeveer in het midden van het meetbereik bevindt.
11. Teken het verloop van de proceswaarde in een twee-standen aan/uit-regeling met hysteresis, in een proces van eerste orde met dode tijd. Bespreek het verloop als de proceswaarde stijgt en als de proceswaarde daalt.
12. Gegeven een aan/uit-regelaar met hysteresis en een proces van eerste orde met dode tijd. Bepaal de benaderende uitdrukkingen voor periode en amplitude samengesteld uit de resultaten van: - regelkring zonder hysteresis met dode tijd. - regelkring met hysteresis zonder dode tijd.
13. Gegeven een eerste orde proces met tijdconstante 10 min. en dode tijd 1 min. De hysteresis van de regelaar is 10°C. Het meetbereik ligt tussen 20°C en 100°C. De gewenste waarde ligt ongeveer in het midden van het meetbereik. Bepaal de periode en de amplitude van de proceswaarde.
14. Gegeven een twee-standen aan/uit-regelaar met hysteresis in een proces van hogere orde met dode tijd. Bespreek het verloop van de proceswaarde en bepaal de periode van de procesbeweging.
15. Maak een vergelijking tussen een aan/uit-regelaar en een proportionele regelaar in een gesloten kring.