

I Enige basisbeschouwingen uit de regeltechniek

1. Inleiding

Regelen en sturen hebben ten doel bepaalde grootheden van een proces te laten verlopen volgens een vooropgesteld plan. Dat plan kan inhouden dat één of meerdere grootheden:

- zo goed mogelijk konstant moeten blijven, bijv. het niveau in een vat, de kwaliteit van een produkt, etc.;
- een tevoren gekozen verloop met de tijd moet volgen (programmaregeling);
- moeten variëren in afhankelijkheid van



IR. F. J. VERGOUWEN
Laboratorium voor Werktuigkundige Meet- en Regeltechniek
TH Delft

één of meer andere grootheden, bijv. een volgsysteem of servosysteem zoals een rembekrachtiger, het op een ster gericht houden van een teleskoop, een verhoudingsregeling, etc.;

- een zodanig verloop met de tijd moeten krijgen dat een bepaald optimum wordt bereikt, bijv. maximale opbrengst, minimale kosten, minimaal brandstofverbruik, etc.

Door de aanwezigheid van storingen en door variaties in de proceseigenschappen kan het doel in de praktijk slechts tot op zekere hoogte worden verwezenlijkt. Regelen en sturen zijn termen die hier gereserveerd worden voor twee principieel verschillende methoden waarmee het doel, een grootheid laten verlopen volgens een bepaald plan, kan worden bereikt. Bij *regelen* wordt de te regelen grootheid gemeten en vergeleken met het plan. Een regelaar stelt op grond van de afwijking een korrigerend orgaan zodanig in dat de bestaande afwijking wordt tegengegaan (zie afb. 1). Deze methode wordt ook regelen door terugkoppeling genoemd. Er is een *gesloten* keten van oorzaak en gevolg aanwijsbaar. Indien de regelaar de korrigerende actie overdoseert, of niet op het juiste moment uitvoert, dan kan instabiliteit optreden: de afwijking neemt niet af maar spontaan toe met de tijd, meestal slingerend met een groeiende amplitude. Bij *sturen* is *geen gesloten keten* van oorzaak en gevolg aanwijsbaar. Voor het beïnvloeden van de te sturen grootheid wordt een geschikte manipuleerbare grootheid gekozen. Aanwezige andere invloedsfactoren worden opgevat als storingen. Het effect van een belangrijke storing op de te sturen grootheid kan worden gekompenseerd door de storing te meten en aan de manipuleerbare grootheid een term toe te voegen die het effect van de storing teniet doet (zie afb. 2). Tegenover het voordeel van het ontbreken van het gevaar voor instabiliteit staat dat niet wordt gedetekteerd of het nagestreefde doel onder alle omstandigheden wordt gerealiseerd. Van beide principes volgt hier een voorbeeld:

— Het niveau in een vat is afhankelijk van de toe- en afvoerstroom (zie afb. 3). Stel dat de afvoerstroom niet beïnvloedbaar is (verbruikersnet).

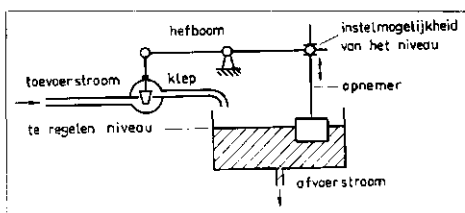
— Het niveau in een vat is afhankelijk van de toe- en afvoerstroom (zie afb. 3). Stel dat de afvoerstroom niet beïnvloedbaar is (verbruikersnet).

Van beide principes volgt hier een voorbeeld:

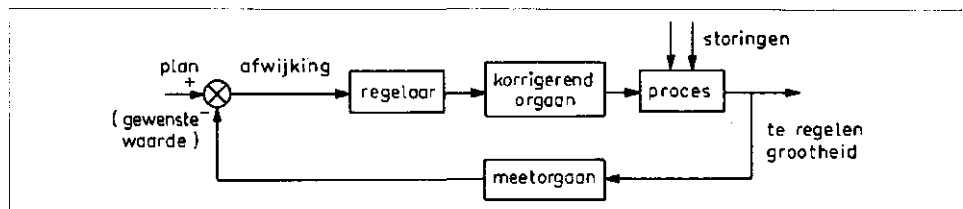
— Het niveau in een vat is afhankelijk van de toe- en afvoerstroom (zie afb. 3). Stel dat de afvoerstroom niet beïnvloedbaar is (verbruikersnet).

— Het niveau in een vat is afhankelijk van de toe- en afvoerstroom (zie afb. 3). Stel dat de afvoerstroom niet beïnvloedbaar is (verbruikersnet).

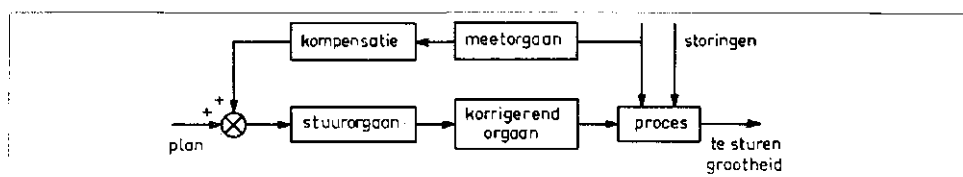
Afb. 3 - Kontinue regeling van het niveau in een vat door terugkoppeling.



Afb. 1 - Principe van regelen door terugkoppeling.



Afb. 2 - Principe van sturen en compenseren van het effect van één van de storingen: 'regelen' door voorwaartskoppeling.



Variaties in deze stroom dragen dus het karakter van een storing. Het niveau wordt gemeten met behulp van een vlotter. De hefboom vormt de regelaar die het korrigerend orgaan, de klep, zodanig bedient dat afwijkingen van het gewenste niveau, veroorzaakt door o.m. variaties in de afvoerstroom worden tegengegaan. De regeling kan continu, afb. 3, of diskontinu, afb. 4, werken. In het laatste geval varieert het niveau tussen twee grenzen. In beide gevallen spreken we van regeling door tegenkoppeling.

— De temperatuur van de warmwaterstroom uit een gasgeyser wordt niet geregeld maar gestuurd (zie afb. 5). Bij een bepaalde gasstroom, en dus warmtestroom, hebben variaties in de waterstroom de grootste invloed op de temperatuur. Door de waterstroom te meten en de gasstroom te doseren in een bepaalde vaste verhouding tot de waterstroom zal de temperatuur globaal konstant blijven. Storingen die niet gecompenseerd worden zijn bijv. de koudwatertemperatuur en variaties in de verbrandingswarmte van het gas.

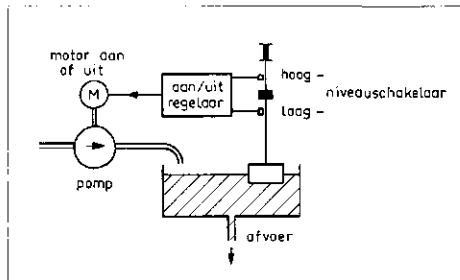
Slechts weinig processen kunnen zodanig worden ontworpen dat de van belang zijnde grootheden automatisch volgens plan verlopen. Daarom is regelen of sturen of een combinatie van beide principes nodig om op ieder moment de gewenste bedrijfs-toestand te realiseren en deze te handhaven ondanks de aanwezigheid van storende invloeden.

De wijze waarop de regeling van een proces funktioneert kan aanschouwelijk worden voorgesteld door een blokschema. Elk blok stelt voor de relatie tussen de te regelen variabelen (uitgangsgrootheden), de manipuleerbare variabelen (ingangsgrootheden) met behulp waarvan de te regelen variabelen kunnen worden beïnvloed en tenslotte storingen, dit zijn de niet gemanipuleerde of niet manipuleerbare invloeds-grootheden. De pijlen geven de oorzaak-gevolg richting aan. Verondersteld wordt dat geen terugwerking optreedt.

De relaties tussen de diverse variabelen zijn zelden alleen statische relaties; meestal dragen ze een dynamisch karakter: de uitgangsvariabele is ook afhankelijk van de snelheid waarmee een ingangsvariabele varieert. Naast lineaire relaties komen dikwijls ook niet-lineaire relaties voor. De relaties zijn soms afhankelijk van de tijd, zijn niet altijd deterministisch van aard maar kunnen ook een stochastisch (niet geheel voorspelbaar) karakter vertonen.

2. Eisen te stellen aan een regeling

De eerste eis die aan een regeling moet worden gesteld is dat storingen in voldoende



Afb. 4 - Aan-uit regeling van het niveau in een vat door tegenkoppeling.

mate worden onderdrukt. Hiertoe is nodig dat geformuleerd kan worden wat 'in voldoende mate' is, welke storingen een belangrijke invloed uitoefenen en hoe ze kunnen worden beschreven.

De wijze waarop een geregeld proces reageert op bepaalde storingen kan pas worden vastgesteld indien de eigenschappen van proces, regelaar en andere onderdelen van de regelketen volledig bekend zijn: regeling en proces tezamen bepalen het *stoorgedrag*. Een tweede eis die dikwijls wordt gesteld is dat variaties in de gewenste waarde van de geregelde grootheid voldoende snel worden gevolgd, anders gezegd, dat afwijkingen tussen geregelde grootheid en plan voldoende snel worden onderdrukt. Deze eis is vooral van belang bij programma-regelingen en volgsystemen. De wijze waarop een geregeld proces reageert op veranderingen in de gewenste waarde van de te regelen grootheid heet *regelgedrag*. Ook het regelgedrag is afhankelijk van de eigenschappen van zowel het proces als alle onderdelen van de regelkring.

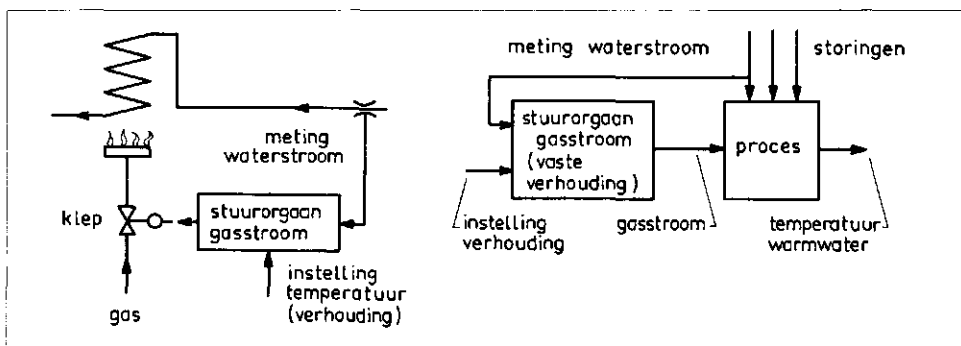
Naast bovengenoemde eisen kunnen nog diverse andere eisen worden geformuleerd.

3. Ontwerpen van een regeling

3.1. Het opstellen van mogelijke oplossingen

De aan de regeling te stellen eisen zijn meestal niet hard geformuleerd. Ook de op het proces inwerkende storingen zijn niet altijd voldoende bekend. Toch moet de ontwerper van een regeling een groot aantal keuzen doen die in belangrijke mate

Afb. 5 - Sturing van de warmwatertemperatuur van een geysers door compenseren van het effect van de waterstroom op de temperatuur: 'regeling' door voorwaartskoppeling.



de kwaliteit van de regeling kunnen beïnvloeden. Hij zal een aantal alternatieve oplossingen moeten vergelijken en beoordelen en bij de keuze zullen naast regeltechnische ook bijv. kostenoverwegingen een rol spelen.

Een regelaar kan continu of diskontinu werken (zie het voorbeeld in afb. 3 en 4). De diskontinu werkende aan-uit regelaars zijn goedkoper. Deze kunnen evenwel alleen worden toegepast wanneer een cyclische rimpel op de te regelen grootheid toelaatbaar is, bijv. bij centrale verwarming, koelkast, compressorinstallatie en niveau-regeling.

Bevat het proces meer dan één te regelen grootheid en ingrijpmogelijkheid dan moet gekozen worden welke ingangsgrootheid het beste kan worden gebruikt voor het beïnvloeden van een bepaalde uitgangsgrootheid.

Door aan de regelaar ook een dynamisch verband tussen in- en uitgang te geven kan de regeling worden verbeterd. Het dynamisch gedrag is variabel gemaakt: de regelaar heeft een aantal instelmogelijkheden en kan daarmee optimaal aan het proces en de gestelde eisen worden aangepast. De instelling van de parameters van de regelaar dient experimenteel, door berekening of door simulatie te worden bepaald. Bij toepassing van beide laatste methoden moet ook het dynamisch gedrag van het proces bekend zijn.

3.2. Analyse van het dynamisch gedrag van proces en regeling

De dynamische relaties tussen de variabelen van een proces zijn in principe te beschrijven door (stelsels van) differentiaalvergelijkingen.

Een belangrijke vraag hierbij is of het proces mag worden beschouwd als een lineair systeem, dit is een systeem waarvoor het superpositiebeginsel geldt. Als een variatie x_1 van een ingangsvariabele een responsie y_1 van een uitgangsvariabele tot gevolg heeft en een variatie x_2 een responsie y_2 , dan heet een systeem lineair indien, voor alle x_1 en x_2 , geldt dat een

variatie ($x_1 + x_2$) een responsie ($y_1 + y_2$) tot gevolg heeft.

Alle lineaire systemen kunnen worden beschreven door lineaire differentiaalvergelijkingen met konstante of ten hoogste tijdsafhankelijke koëfficiënten.

Vrijwel alle werkelijke processen bevatten niet-lineariteiten, evenwel, voor kleine variaties in de variabelen rond een bedrijfs-toestand kunnen de relaties dikwijls toch voldoende goed worden weergegeven door een lineaire differentiaalvergelijking. De waarde van de koëfficiënten is wel afhankelijk van de gekozen bedrijfstoestand. We noemen dit lineariseren van de betrekkingen.

Verkeert het proces in de ontwerpfase dan kunnen de gevraagde relaties worden berekend uit de ter beschikking staande gegevens over afmetingen, vorm, etc. en door gebruik te maken van fysische wetmatigheden, zoals de wetten van behoud van massa, energie en impuls, chemische reactieformules, etc.

Toepassing op een eenvoudig voorbeeld (zie afb. 6).

Gevraagd wordt te bepalen de dynamische relatie tussen vloeistofniveau N , klepheffing X en pompdruk P .

Uit de massabalans volgt: toevoerstrom — afvoerstrom = verandering van opslag

$$\Phi_1 - \Phi_u = \frac{d}{dt} (N \cdot A) \quad (1)$$

Neem aan dat geldt

$$\Phi_1 = C_1 \cdot X \sqrt{P} \quad (2)$$

en

$$\Phi_u = C_2 \cdot \sqrt{(N + N_1)} \quad (3)$$

Stel in verband met het lineariseren dat

$$\Phi_1 = \bar{\Phi}_1 + \phi_1$$

$$X = \bar{X} + x$$

$$\Phi_u = \bar{\Phi}_u + \phi_u$$

$$N = \bar{N} + n$$

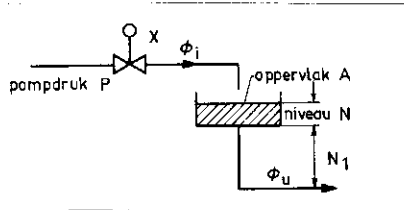
$$P = \bar{P} + p \quad (4)$$

De kleine letters stellen voor kleine variaties rond een bedrijfstoestand welke wordt gekarakteriseerd door de overgestreepte hoofdletters.

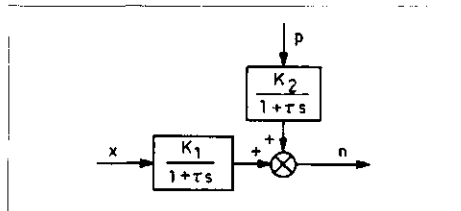
Invullen van de relaties (4) in (2) en (3) geeft

$$\phi_1 = C_1 \sqrt{\bar{P}} \cdot x + \frac{1}{2} C_1 \frac{\bar{X}}{\sqrt{\bar{P}}} \cdot p \quad (5)$$

en



Afb. 6 - Bepaling verband tussen niveau, klepheffing en pompdruk.



Afb. 7 - Blokschemavoorstelling van het gelineariseerde verband tussen niveau, klepheffing en pompdruk.

$$\phi_u = \frac{1}{2} \frac{C_2}{\sqrt{(\bar{N} + \bar{N}_1)}} \cdot n \quad (6)$$

Invullen van (5) en (6) in (1) geeft

$$\tau \frac{dn}{dt} + n = K_1 \cdot x + K_2 \cdot p \quad (7)$$

met

$$\tau = \frac{2A \sqrt{(\bar{N} + \bar{N}_1)}}{C_2}, \quad K_1 = 2 \frac{C_1}{C_2} \sqrt{\bar{P}(\bar{N} + \bar{N}_1)}$$

$$K_2 = \frac{C_1 \bar{X}}{C_2} \sqrt{\left\{ \frac{\bar{N} + \bar{N}_1}{\bar{P}} \right\}}$$

Invoering van de differentiaaloperator

$$s = \frac{d}{dt}$$

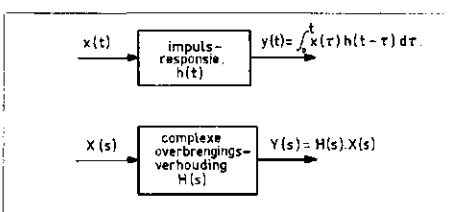
geeft

$$n = \frac{K_1}{\tau s + 1} \cdot x + \frac{K_2}{\tau s + 1} \cdot p \quad (8)$$

wat weergegeven kan worden in een blok-schema (zie afb. 7).

Variatie van de klepheffing wordt beschouwd als ingangsgrootheid waarmee het te regelen niveau wordt beïnvloed; variatie in de pompdruk heeft een storende invloed op het niveau.

Afb. 8 - Blokschemarepresentatie in tijdsdomein en frekwentiedomein.



De variabelen x , p en h zijn tijdsafhankelijke signalen. Bij gegeven $x(t)$ of $p(t)$ kan $h(t)$ worden bepaald door oplossen van de 1e orde differentiaalvergelijking.

Is het proces een onderdeel van een regelketen, dan kan, indien van elk onderdeel het verband tussen in- en uitgang in een vergelijking is weer te geven, een differentiaalvergelijking voor het gehele systeem worden opgesteld. Voor een lineair systeem is deze altijd oplosbaar. De methode is bruikbaar maar verschaft weinig inzicht in de wijze waarop elk der onderdelen bijdraagt in het totale gedrag.

Naast de karakterisering van een in-uitgangsrelatie door een differentiaalvergelijking zijn nog andere beschrijvingswijzen mogelijk. De eigenschappen van een lineair systeem worden ook volledig vastgelegd door de responsie op een bepaald signaal, waartoe dikwijls de eenheidsimpuls, de eenheidsstap en de sinus worden gebruikt. Duhamel heeft aangetoond dat het verband tussen hetingangssignaal $x(t)$ en het uitgangssignaal $y(t)$ is weer te geven door een convolutie-integraal

$$y(t) = \int_0^t x(\tau) \cdot h(t - \tau) d\tau$$

waarin

$h(t)$ = de eenheidsimpulsresponsie van het systeem.

Een dergelijke integraal leent zich, in discrete vorm, goed voor berekeningen met een digitale computer.

Door toepassing van de Laplacetransformatie gaat de convolutie-integraal over in een gewoon product:

$$Y(s) = H(s) \cdot X(s)$$

waarin:

$$Y(s) = L\{y(t)\},$$

$$X(s) = L\{x(t)\},$$

$$H(s) = L\{h(t)\} \text{ en}$$

$s = \lambda + j\omega$ = complexe frekwentie,

λ = dempingsfaktor en

ω = radiaalfrekwentie (afb. 8).

De fysische betekenis hiervan is onder meer dat als $X(s)$ een ongedempte ($\lambda = 0$), sinusvormige variatie is van de vorm $X(\omega) = A \sin \omega t$ en de stationnaire responsie hierop $Y(\omega) = B \sin(\omega t + \varphi)$, dat de complexe uitdrukking $H(j\omega)$ weergeeft hoe de amplitude verandert en welke fazedraaiing optreedt. Aangetoond kan worden dat de

$$\text{amplitudeverhouding } \alpha(\omega) = \frac{B}{A} = \text{modulus}$$

$\{H(j\omega)\}$ en dat de fazedraaiing $\varphi(\omega) = \text{argument } \{H(j\omega)\}$.

Om deze reden wordt $H(s)$ de complexe

overbrengingsverhouding genoemd.

Verder kan worden aangetoond dat bij Laplacetransformatie de differentiaalbewerking overgaat in vermenigvuldigen met s , Zonder daadwerkelijk gebruik te maken van de Laplacetransformatiemethode kan daarom een lineaire differentiaalvergelijking worden omgevormd tot een complexe

overbrengingsverhouding door $\frac{d}{dt}$ te vervan-

gen door s , $\frac{d^2}{dt^2}$ door s^2 , etc.

Komplexe overbrengingsverhoudingen van opeenvolgende blokken kunnen met elkaar worden vermenigvuldigd.

$$H(s) = H_1(s) \cdot H_2(s) \dots H_n(s)$$

met als voordeel dat

$$\alpha = |H(s)| = \prod_{i=1}^n |H_i(s)|$$

en

$$\varphi = \arg \{H(s)\} = \sum_{i=1}^n \arg \{H_i(s)\}$$

Een en ander kan grafisch worden weergegeven in een zogenaamd bodediagram of in een polair diagram.

In een bodediagram wordt $\alpha(\omega) = |H(j\omega)|$ op dubbellogaritmische schaal uitgezet tegen de frekwentie ω : vermenigvuldigen van α waarden gaat dan over in optellen. De fazedraaiing $\varphi(\omega)$ wordt lineair uitgezet tegen de frekwentie ω op logarithmische schaal.

In een polair diagram wordt $H(j\omega)$ uitgezet als vektor in het complexe vlak. Van het eerdergenoemde voorbeeld zijn bodediagram en polair diagram weergegeven in afb. 9.

3.3. Gebruik van blokschema's in het frekwentiedomein

Met behulp van blokschema's en weergave van signalen en hun onderlinge relaties in het frekwentiedomein kunnen enige eerdergenoemde begrippen nader worden toegelicht.

Een tegengekoppeld regelsysteem kan onder bepaalde omstandigheden instabiel worden. Voor het in afb. 10 gegeven blokschema van een regelkring geldt:

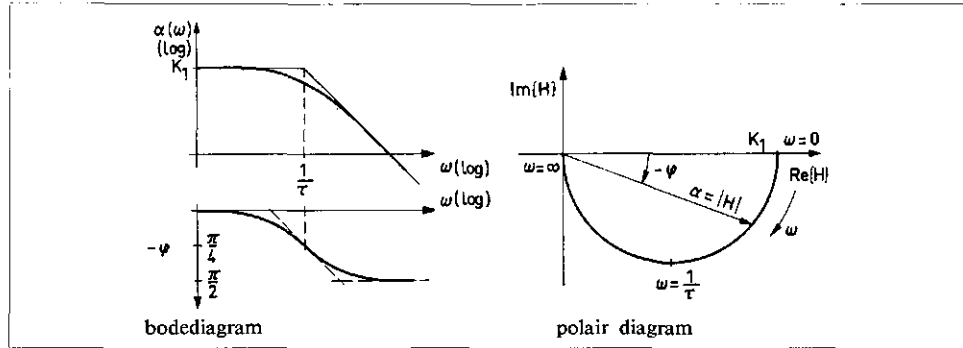
$$E = R - H_3 \cdot Y$$

$$Y = H_1 \cdot H_2 \cdot E + H_2 \cdot Z$$

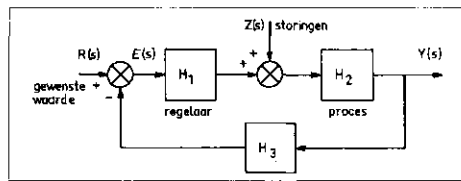
$$H_{\text{totaal}}(\omega) = \left(\frac{Y}{R} \right)_{Z=0} = \frac{H_1 \cdot H_2}{1 + H_1 \cdot H_2 \cdot H_3}$$

$$H \text{ (recht doorgaand)}$$

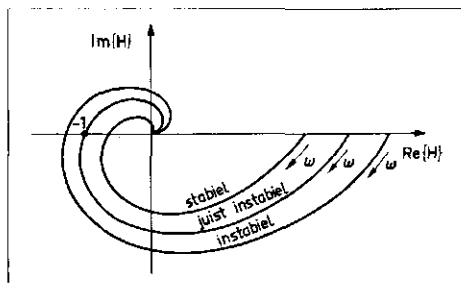
$$1 + \overset{\circ}{H} \text{ (rondgaand)}$$



Afb. 9 - Bodediagram en polair diagram voor de overbrengingsverhouding $H(s) = \frac{K_1}{1 + ts}$.



Afb. 10 - Blokschema van een regelkring.



Afb. 11 - Polaire figuren van rondgaande overbrengingsverhoudingen voor het stabiele en het instabiele geval.

$H_{\text{totaal}}(\omega)$ stelt voor het *regelgedrag* in het frekwentiedomein.

Indien $\overset{\circ}{H} \equiv -1$ dan wordt de noemer van H_{totaal} nul.

Het systeem kan een uitgangssignaal hebben, zonder aanwezigheid van een ingangssignaal, of het systeem is instabiel. Door Nyquist is aangetoond dat een gesloten keten, bestaande uit stabiele overbrengingsverhoudingen, alleen stabiel is indien het punt $(-1,0)$ in het polair diagram links

van de kromme $\overset{\circ}{H}(j\omega)$ ligt wanneer deze kromme in de richting van toenemende ω wordt doorlopen (zie afb.11).

Het *stoorgedrag* in het frekwentiedomein is

$$H_{\text{stoor}}(\omega) = \left(\frac{Y}{Z} \right)_{R=0} = \frac{H_2}{1 + \overset{\circ}{H}} =$$

$$H \text{ (recht tussen Z en Y)}$$

$$1 + \overset{\circ}{H} \text{ (rondgaand)}$$

Een goede regeling vereist een minimale

invloed van een storing op de te regelen grootte. Dit kan worden bereikt door

$\overset{\circ}{H}(\omega) \gg 1$ te kiezen of, daar H_2 meestal gegeven is, door $H_1 H_3(\omega)$ met behulp van de regelaar zo groot mogelijk te kiezen in het frekwentieggebied waarbinnen $Z(\omega)$ betekenis heeft. Het gevaar voor het ontstaan van instabiliteit stelt een duidelijke grens aan het verhogen van de versterking. Bij programmaregelingen en volgsystemen is meestal $H_3 = 1$ (of een konstante faktor). Een goed regelgedrag vereist dat

$$\left(\frac{Y}{R} \right)_{Z=0} = 1 \text{ (of een konstante faktor)}$$

over een zo breed mogelijk frekwentieggebied. Dat is te realiseren door $H_1 H_2 \gg 1$ te kiezen,

$$\text{zodat } \frac{H_1 H_2}{1 + H_1 H_2} \approx 1.$$

Is H_2 niet meer vrij te kiezen dan betekent dit dat $H_1 \gg 1$ moet worden, wat door de regelaar kan worden gerealiseerd. Ook hier stelt het gevaar voor instabiliteit een grens aan het vergroten van de versterking.

4. Samenvatting

Het volgens een vooropgesteld plan laten verlopen van bepaalde grootheden van een proces kan worden gerealiseerd door te regelen (gesloten keten) of te sturen (open keten) of door toepassing van een combinatie van beide principes.

Bij regelen door tegenkoppeling wordt in principe het effect van alle verstoringen die aangrijpen tussen aftrekpunt en procesuitgang tegengegaan.

Bij sturen wordt het effect van elke belangrijke verstoring afzonderlijk gecompenseerd, zonder controle op het eindresultaat.

De kwaliteit van een regeling of besturing is te karakteriseren door de begrippen stoorgedrag en regelgedrag.

Kennis van de aard van de storingen en van de dynamische eigenschappen van het proces zijn nodig om te kunnen beoordelen of een bepaalde regeling aan de

gestelde eisen zal kunnen voldoen. Een goed stoorgedrag en een goed regelgedrag kunnen bij een tegengekoppeld regelsysteem worden bereikt door een zo groot mogelijke versterking in de rondgaande keten, over een zo breed mogelijk frekwentiegebied. De mogelijkheid tot vergroten van de versterking wordt begrensd door het gevaar voor instabiliteit van de regelkring.

Indien door het gevaar voor instabiliteit een onbevredigend stoorgedrag resulteert dan zal dit op andere wijze moeten worden verwezenlijkt, bijv. door een combinatie van regeling en storingskompensatie door voorwaartsregeling.

