

Optimale beheersing, hoe en waarom?

Citation for published version (APA):

Brevoord, G. (1991). *Optimale beheersing, hoe en waarom? een voorstudie naar de verbetering van de beheersbaarheid van het chloorproductieproces van Solvay Chemie*. (DCT rapporten; Vol. 1991.038). Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1991

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

stagerapport TUE, WFW

OPTIMALE BEHEERSING, HOE EN WAAROM ?

Een voorstudie naar de verbetering
van de beheersbaarheid van het chloor-
produktieproces van Solvay Chemie.

Door: Gert Brevoord

Eindhoven, mei 1991

In opdracht van: Solvay Chemie.

Begeleiders: Bram de Jager (TUE) en Frits Staals (Solvay Chemie).

Vakgroep: WFW

Rapportnummer: 91.038

SAMENVATTING

In dit rapport wordt besproken hoe de ontwikkeling van een nieuw druk-regelsysteem voor het chloor-produktieproces van Solvay Chemie opgezet kan worden.

Tijdens het onderzoek, wat in de vorm van een stage is uitgevoerd, is gebleken dat voordat met de eigenlijke ontwikkeling van een druk-regelsysteem begonnen kan worden er eerst meer kennis van het dynamisch gedrag van het systeem verkregen dient te worden. Door met het systeem metingen uit te voeren moet dit dynamisch gedrag bepaald worden.

Om het aantal metingen, die in de loop van het onderzoek uitgevoerd moeten worden, tot een minimum te beperken is besloten om tot modelvorming over te gaan. De eerste fase van deze modelvorming bestaat uit het opzetten van een theoretisch model. Tijdens de stage is een theoretisch model gemaakt. Het theoretisch model is met behulp van fysische wetten en de huidige proceskennis gemaakt. Met het theoretisch model ontstaat een eerste indruk van het dynamisch gedrag van het chloor-produktieproces en wordt ook de structuur van het uiteindelijke model vastgelegd.

In de toekomst moet de tweede fase van modelvorming worden uitgevoerd. Het theoretisch model moet aan de hand van één of meerdere confrontaties met metingen bijgesteld worden (parameterschatten). Verder moet het model op een aantal punten uitgebreid worden (structuur veranderingen). Als het model de werkelijkheid voldoende nauwkeurig nabootst kan met behulp van dit model het druk-regelsysteem ontworpen worden. Het uittesten van ontworpen druk-regelsystemen kan nu met het model uitgevoerd worden.

In dit rapport worden de achtergronden behorend bij de opdracht en de methode van aanpak van die uitwerking besproken. Verder wordt het ontworpen theoretisch model en worden de in de toekomst uit te voeren deelonderzoeken behandeld. Het is de bedoeling dat mede aan de hand van dit rapport wordt besloten of het onderzoek in de vorm van een afstudeerproject wordt voortgezet.

INHOUDSOPGAVE

Samenvatting	blz. 1
1. Inleiding	blz. 3
2. Het chloor-productieproces	blz. 4
3. Opdracht	blz. 7
4. Modelvorming	blz. 8
4.1 Waarom modelvorming ?	blz. 8
4.2 Hoe is de modelvorming uitgevoerd ?	blz. 8
4.3 Simulaties	blz. 9
5. Toekomst	blz. 10
5.1 Verbetering van het model	blz. 10
5.2 Ontwerpen van een regeling	blz. 13
5.3 Afstudeerprojekt	blz. 13
5.4 Kosten	blz. 14
6. Conclusies	blz. 15
Bijlage 1	Eigenschappen van het chloor-productieproces
Bijlage 2	Modelvorming van het chloor-productieproces
Bijlage 3	Simulaties en programma's
Symbolenlijst	
Uitvouwblad	

1. inleiding

1. INLEIDING

Binnen het kader van mijn opleiding bij de vakgroep Fundamentele Werktuigkunde van de faculteit Werktuigbouwkunde van de Technische Universiteit te Eindhoven (TUE) heb ik de afgelopen maanden een stage uitgevoerd. De stage is uitgevoerd bij Solvay Chemie te Linne-Herten. Mijn begeleiders waren Bram de Jager (TUE) en Frits Staals (Solvay).

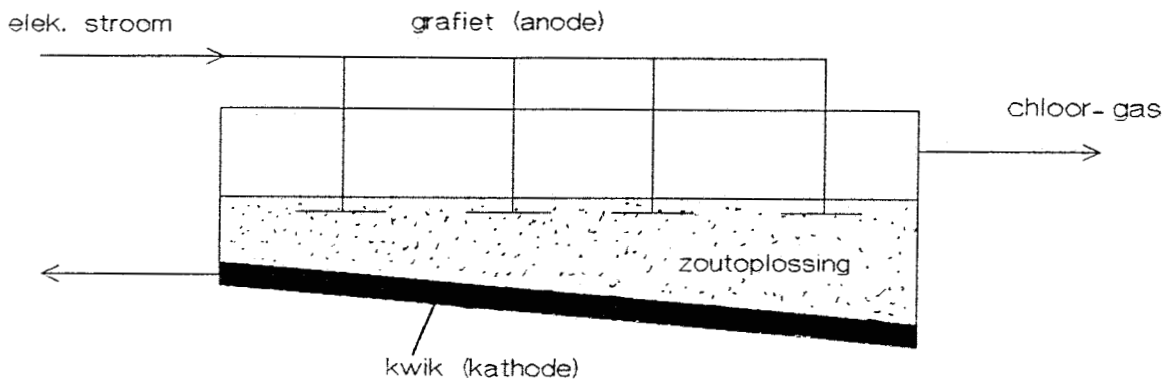
Solvay Chemie is een onderdeel van de Solvay-groep. De Solvay-groep houdt zich bezig met verschillende takken van de chemie. Er werken verspreid over 32 landen 44.000 mensen. Het hoofdkantoor is in Brussel gevestigd. In Nederland zijn 6 vestigingen van Solvay, waaronder dus Solvay Chemie waar 370 mensen werken. Eén van de produkten die bij Solvay Chemie gefabriceerd wordt is chloor (Cl_2). Het druk-regelsysteem van dit produktieproces kan bij dagelijks optredende extreme situaties (bijvoorbeeld het nagenoeg stopzetten van de produktie) het proces niet voldoende beheersen. Hierdoor is bij Solvay de behoefte ontstaan aan een nieuw druk-regelsysteem. De vraag is nu op welke wijze dit druk-regelsysteem het best ontworpen kan worden.

Solvay heeft indertijd het bovenstaande probleem aan mij voorgelegd. Er is toen besloten om dit probleem tijdens een stage te beschouwen. Tijdens de stage is een start gemaakt met het onderzoek naar de ontwikkeling van een nieuw druk-regelsysteem. In dit rapport worden de gevonden resultaten beschreven. Aan de orde komen de door mij vastgelegde methode van aanpak voor de ontwikkeling van een nieuw druk-regelsysteem en de huidige stand van het hieruit afgeleide onderzoek. Verder wordt beschreven hoe en met welke middelen dit onderzoek voorgezet kan worden, en welke rol ik hierin kan spelen.

2. het chloor-productieproces

2. HET CHLOOR-PRODUKTIEPROCES

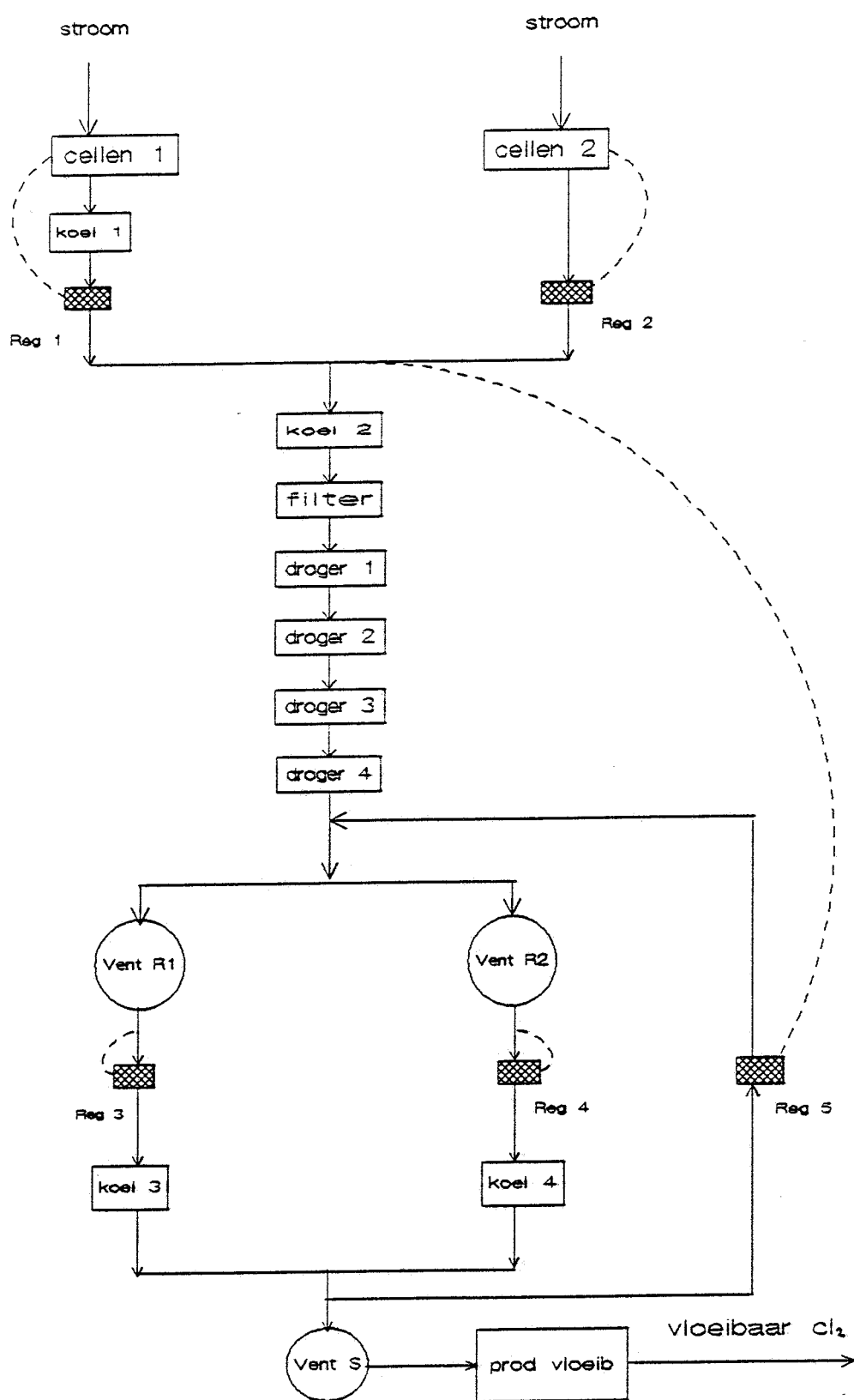
Bij Solvay wordt via een elektrolyse-proces uit een zoutoplossing (NaCl in H_2O) chloorgas (Cl_2) gevormd. Dit elektrolyse-proces vindt plaats in zogenaamde cellen waar de elektroden (anode + kathode) zich bevinden en waar de zoutoplossing doorheen stroomt (zie figuur 2.1).



figuur 2.1

Door de cellen wordt een voor elektrolyse benodigde elektrische stroom geleid. Hiermee wordt de chloorproductie gestuurd. Tijdens de elektrolyse wordt naast Cl_2 -gas ook H_2O -gas (door verdamping) gevormd. In sommige gevallen wordt ook H_2 -gas gevormd. Het geproduceerde gas wordt door ventilatoren uit de cellen gezogen. Het gas wordt voordat het de verschillende ventilatoren bereikt eerst nog meerdere malen gekoeld en gedroogd, dit om een zuiver Cl_2 -gas te verkrijgen. Nadat het Cl_2 -gas de ventilatoren gepasseerd is worden nog een aantal bewerkingen uitgevoerd zodat uiteindelijk Cl_2 -vloeibaar ontstaat. In figuur 2.2 is het chloor-productieproces schematisch weergegeven.

2. het chloor-productieproces



figuur 2.2

2. het chloor-produktieproces

In bijlage 1 is dat gedeelte van het produktieproces weergegeven waar het onderzoek betrekking op heeft. In deze bijlage worden ook alle in het systeem aanwezige componenten met bijbehorende eigenschappen beschouwd. Verder worden nog enige relevante eigenschappen van het produktieproces beschreven.

Chloor is een giftige stof. Er moet dus voorkomen worden dat chloor uit het produktiesysteem kan ontsnappen. De druk-regelingen (zie figuur 2.2) hebben dan ook als voornaamste taak om het ontsnappen van chloor ten allen tijde te voorkomen. In bijlage 1 worden de druk-regelingen besproken.

Bij kleine verstoringen kunnen de druk-regelingen het systeem beheersen. Als er echter grote verstoringen optreden moeten de druk-regelingen handmatig bijgestuurd worden (setpoints wijzigen). Het zal duidelijk zijn dat dit, zeker wat betreft de veiligheid, geen optimale situatie is.

Solvay betreft de voor elektrolyse benodigde elektrische stroom van het Limburg distributiebedrijf. Op bepaalde gedeeltes van de dag wordt er veel elektrische stroom door klanten van het distributiebedrijf afgenomen. Deze dagdelen worden piek-uren genoemd. Tijdens deze piek-uren doet Solvay aan piek-shaving, dit om het distributiebedrijf te ontlasten. Piek-shaving bespaart Solvay extra elektriciteits-kosten. Tijdens de piek-shaving wordt het produktieproces nagenoeg stopgezet (de elektrische stroom wordt nagenoeg uitgeschakeld). Gemiddeld gebeurt dit nagenoeg stopzetten en daarna weer opstarten van het proces twee keer per dag.

Het nagenoeg uitschakelen en daarna weer inschakelen van de elektrische stroom zijn voorbeelden van een grote verstoringen (in dit verslag ook wel extreme situaties genoemd). Tijdens het verkleinen en vergroten van de stroom moeten de regelaars dus met de hand worden bijgestuurd. Het gevolg is dat er onveilige situaties kunnen ontstaan en dat de snelheid van het verkleinen en vergroten van de stroom (wat in stappen gebeurt) onvoldoende is.

3. opdracht

3. OPDRACHT

De opdracht luidt:

Ontwikkel een druk-regeling voor het chloor-produktieproces die het proces ook bij extreme situaties kan beheersen. Grote en snelle elektrische stroomvariaties moeten bij deze ontwikkeling extra aandacht krijgen.

Doel van de opdracht is om te komen tot een veiliger produktie-systeem en een systeem dat sneller op grote verstoringen kan reageren.

Daar het chloor-produktieproces complex is, en daar er weinig relevante kennis over het dynamisch gedrag van het proces aanwezig is, is het onmogelijk om in de voor de stage beschikbare tijd een druk-regeling te ontwikkelen. De stage moet dan ook gezien worden als een vooronderzoek. Er moet bepaald worden op welke wijze de druk-regeling ontwikkeld kan worden en welke middelen hiervoor benodigd zijn. Verder moet een start worden gemaakt met de ontwikkeling van het druk-regelsysteem.

4. modelvorming

4. MODELVORMING

4.1 Waarom modelvorming ?

Voordat een regeling ontworpen kan worden is het van belang dat er voldoende kennis van het produktiesysteem aanwezig is. Daar er weinig over het dynamisch gedrag van het systeem bekend is, moet in eerste instantie de aandacht op dit punt gevestigd worden.

Door het uitvoeren van metingen kan het dynamisch gedrag van het systeem bij verschillende situaties bepaald worden. Met metingen wordt in dit geval bedoeld het op het systeem aanbrengen van een verstoring en het meten van het gevolg van deze verstoring. Er zitten een aantal nadelen aan het uitvoeren van metingen, namelijk: metingen verstoren het produktieproces, metingen kunnen leiden tot onbeheersbare (onveilige) situaties en metingen zijn duur.

Om het aantal metingen tot een minimum te beperken is het gebruikelijk om van het systeem een wiskundig model te maken. De eerste fase van deze modelvorming is het ontwerpen van een theoretisch model. Met behulp van fysische wetten en de proceskennis moet een theoretisch model gemaakt worden. Met dit theoretische model kunnen simulaties uitgevoerd worden. Er kan dus een globaal beeld van het gedrag van het systeem verkregen worden. Verder legt het theoretische model ook de structuur van het uiteindelijke model vast.

Mede met behulp van de verkregen globale systeemkennis moeten nu metingen met het produktieproces uitgevoerd worden. Aan de hand van de metingen moet het model dan zo bijgesteld worden totdat uiteindelijk de werkelijkheid voldoende goed benaderd wordt (de tweede fase van modelvorming). Het aantal uit te voeren metingen is mede afhankelijk van de kwaliteit van het theoretische model. Als éénmaal een goed model gevonden is (berekend gedrag komt overéén met de metingen), kan met dit model het dynamisch gedrag van het produktiesysteem nader bepaald worden. Dit bespaart dus een (groot) aantal metingen. Een ander belangrijk voordeel van modelvorming is dat met behulp van dit model druk-regelingen ontworpen en getest kunnen worden (weer een besparing van metingen).

4.2 Hoe is de modelvorming uitgevoerd ?

Voor de modelvorming wordt het produktieproces beschouwd als een systeem bestaande uit volumes en weerstanden. De componenten die in het proces aanwezig zijn worden als volumes beschouwd. In deze volumes vindt een aktie plaats. De verbindingsleidingen tussen de componenten worden als weerstanden beschouwd.

4. modelvorming

Het is nu mogelijk om voor de drukken die in de volumes optreden en de klepstanden (weerstanden) die door de regelaars beïnvloed worden een differentiaal vergelijking op te stellen. In bijlage 2 wordt getoond hoe deze differentiaal vergelijkingen opgesteld kunnen worden, en welke differentiaal vergelijkingen voor de verschillende componenten gelden. De opgestelde differentiaal vergelijkingen beschrijven het dynamisch gedrag van het systeem. Met dit stelsel differentiaal vergelijkingen kunnen in principe simulaties met het programma MATLAB (wat op de TUE beschikbaar is) uitgevoerd worden. In dit geval zijn de differentiaal vergelijkingen echter om het stationaire werkpunt van het normale productie-niveau gelineariseerd worden. Dan zijn namelijk alle grootheden bekend en kan de simulatie eenvoudig uitgevoerd worden.

In bijlage 2 wordt het gemaakte theoretische model getoond en besproken. Het theoretische model heeft betrekking op een gedeelte van het chloor-productieproces (van Cellen tot Vent S). Dit is gedaan omdat bij de technologen van Solvay het vermoeden bestaat dat in dit productie-gedeelte de beheersbaarheid verbetering gerealiseerd kan worden. Dit productie-gedeelte reageert namelijk veel sneller op verstoringen dan het gedeelte achter Vent S.

4.3 Simulaties

De simulaties die reeds door mij zijn uitgevoerd hadden als doel om het theoretisch model te testen en eventuele modelfouten te elimineren. Uit de testen is gebleken dat het theoretische model trendmatig met de werkelijkheid overéénkomt.

In bijlage 3 worden enige resultaten van simulaties getoond en besproken.

5. toekomst

5. TOEKOMST

Voor de verwezenlijking van de opdracht spelen twee aspecten een rol, namelijk:

- verbetering van het model.
- ontwerpen van een regeling.

5.1 Verbetering van het model

5.1.1 Door middel van experimenteren.

In eerste instantie moet er een beeld van de kwaliteit van het model verkregen worden. Het effect van een verstoring moet op een aantal verschillende plaatsen gemeten worden.

Het voorstel is nu om de volgende grootheden te meten (zie figuur 2.2 en het uitvouwblad achterin het verslag):

Toestandgrootheden:

- druk in Cellen 1 (P_1).
- druk in verzamelleiding achter cellen (P_3).
- druk achter een Vent R_1 (P_{9a}).
- druk voor vent R_1 (P_8).
- druk voor vent S (P_{11}).

Verstoringsen:

- stroomingangsverstoring (i_1).
- setpointverandering van Reg_1 (spP_1).
- drukverandering achter Vent S (P_{in}).

Overige grootheden:

- temperatuur in Cellen 1.

De hierboven genoemde grootheden hebben betrekking op componenten die verspreid over het productieproces liggen. Er zal met deze metingen een redelijk compleet beeld van het dynamisch gedrag van de verschillende drukken van het systeem ontstaan. De grootheden worden reeds in het huidige productie-systeem gemeten. Er hoeven dus geen extra meetpunten in het systeem geplaatst te worden. De gemeten waarden moeten geregistreerd worden. In ons geval is het inlezen van de meetwaarden in het geheugen van een Personal Computer een goede oplossing. Nu kan direkt met deze meetwaarden gewerkt worden (parameter schatten, inlezen in MATLAB). Als

5. toekomst

gekozen wordt voor bovenstaande methode moeten een aantal meetwaarden, die pneumatisch van aard zijn, omgezet worden in elektrische signalen. Dit is met behulp van P/I omzetters mogelijk.

De metingen moeten vergeleken worden met simulaties uitgevoerd met het theoretisch model. Aan de hand hiervan moet getracht worden om het model te verbeteren (parameterschatten). Als nu blijkt dat de informatie verkregen uit de metingen te beperkt is, moeten meerdere of andere metingen uitgevoerd worden.

Het uitvoeren van metingen zal dus een iteratief karakter hebben. Na een aantal metingen moet het model (aan de hand van deze metingen) weer bijgesteld worden (parameterschatten). Er moet dan weer besloten worden of het model de werkelijkheid voldoende goed benadert en of er nog meerdere of andere metingen uitgevoerd moeten worden, of in het ergste geval dat verder gaan zinloos is.

5.1.2 Door middel van aanpassen en uitbreiden

Door aanpassen (parameter wijzigen) en uitbreiden (structuur veranderingen) van het model kan de kwaliteit van het model verbeterd worden. Hieronder volgen een aantal aspecten die hier betrekking op hebben.

Het theoretische model kan nog verfijnd worden. Een component die nu nog als één geheel gezien wordt, kan worden opgedeeld in meerdere componenten (b.v. etages Cellen 2).

De in sommige gevallen benaderde grootheden of systeemeigenschappen nog eens goed beschouwen. Mede aan de hand van dit rapport, waar alle door mij gebruikte grootheden en veronderstelde systeemeigenschappen zijn vermeld hoop, ik dat er eventuele foutieve of onnauwkeurige benaderingen kunnen worden verbeterd.

De vergelijkingen die nu in het model zijn opgenomen hebben betrekking op massabalansen en regelsignalen. In het model kunnen ook energiebalansen opgenomen worden. Dan kunnen ook de temperatuur veranderingen (een grootheid die in het huidige model konstant verondersteld wordt) beschouwd worden.

Het model zo veranderen dat ook grote verstoringen beschouwd kunnen worden (dit is de doelstelling van modelvorming). De differentiaal vergelijkingen die in het model zijn opgenomen zijn om het werkpunt van het normale produktie-niveau gelineariseerd. Bij grote verstoringen zullen een aantal toestandsgrootheden (drukken en regelsignalen) te ver van het normale produktie-niveau komen te liggen, de gelineariseerde differentiaal vergelijkingen (deze beschrijven het gedrag van het systeem) zullen dan de werkelijkheid niet meer goed benaderen.

5. toekomst

Een oplossing voor dit probleem is om het model aan de hand van berekende toestandsgrootheden regelmatig bij te stellen. Tijdens de simulatie moet dan op vaste tijdstippen de berekende toestandsgrootheden beschouwd worden en aan de hand hiervan de coëfficiënten die in de corresponderende differentiaal vergelijkingen zijn opgenomen gewijzigd worden.

Wat dan eigenlijk gebeurt is dat de op een tijdstip berekende toestandsgrootheden beschouwd worden als een stationair werkpunt. In het dan volgende tijdsinterval (tot het volgende vastgelegde tijdstip) wordt er dan vanuit gegaan dat er variaties rondom dat nieuwe stationaire werkpunt optreden. Als nu de tijdsintervallen klein gekozen worden, kan een goede benadering van de werkelijkheid ontstaan. Het probleem hierbij is dat er lange computerrekentijden (benodigd voor simulatie) ontstaan. Voor deze simulaties is dan ook een snelle en krachtige PC vereist.

Een andere oplossing voor het probleem is om het stelsel niet lineaire differentiaal vergelijkingen (deze vergelijkingen beschrijven het dynamisch gedrag van het systeem bij grote verstoringen) rechtstreeks op te lossen. Voor deze oplossing is ook een snelle en krachtige PC vereist.

5.1.3 Opmerkingen

Bij het verbeteren van het model moet goed op de doelstelling van modelvorming gelet worden. Het is niet nodig dat het model het werkelijke dynamische gedrag van het systeem bij grote verstoringen exakt nabootst. Als het model het werkelijke gedrag maar in grote lijnen benadert, is dit in principe voor het ontwerpen van een nieuw regelsysteem (de doelstelling van de opdracht) voldoende. Het is niet ongebruikelijk om bij een dergelijk model afwijkingen van maximaal 10% toe te laten.

Voordat het theoretisch model met de werkelijkheid geconfronteerd gaat worden, is het verstandig om een aantal aanpassingen en uitbreidingen reeds door te voeren. Dit verhoogt de kans dat het theoretisch model met de werkelijkheid overéénkomt.

Als bij de confrontatie van het theoretisch model met de werkelijkheid blijkt dat het theoretisch model de werkelijkheid slecht benadert, is het probleem dat er dan een parameter of een set parameters gevonden moet worden die het verschil veroorzaken. Ook bestaat de kans dat er bij theoretische modelvorming gepleegde aannames niet juist zijn, met andere woorden dat de structuur van het model niet goed is.

5. toekomst

Het probleem van het aan de hand van de metingen aanpassen en eventueel uitbreiden van het model kan complex zijn. Het is daarom verstandig om het probleem in enkele deelproblemen te splitsen. De splitsing die doorgevoerd kan worden is die van de beschouwing van een lineair model en een niet lineair model. In eerste instantie moet het lineaire model verbeterd worden. Als uit de confrontatie met de metingen blijkt dat dit onmogelijk is moet dit probleem opgesplitst worden in enkele deelproblemen. In tweede instantie moet dan het niet lineaire model verbeterd worden. Ook hier kan een opsplitsing in een aantal deelproblemen noodzakelijk zijn.

5.2 Ontwerpen van een regeling

Bij voortzetting van het onderzoek zal steeds meer de nadruk komen te liggen op de eigenlijke ontwikkeling van het drukregelsysteem. Bij deze ontwikkeling moet naast de klassieke regeltheorie (werken in het frequentiedomein, PID-regelaars etc.) ook aandacht worden besteed aan de moderne regeltheorie (werken in het tijdsdomein, toestandsterugkoppeling en toestandsreconstructie). Dit vergroot de kans dat het beoogde drukregelsysteem (een systeem dat ook grote verstoringen kan beheersen) gevonden wordt. Over de haalbaarheid van bovenstaande doelstelling is nog niets concreets te zeggen.

5.3 Afstudeerprojekt

Er bestaat de mogelijkheid om het onderzoek in de vorm van een afstudeerprojekt voor de TUE voort te zetten. Als hiervoor gekozen wordt, kan gebruik worden gemaakt van de gespecialiseerde kennis die binnen de vakgroep Fundamentele werktuigkunde aanwezig is. Verder zal vanuit de vakgroep de afstudeerder begeleid worden, en kan er gebruik worden gemaakt van de faciliteiten die op de TUE beschikbaar zijn. Het zal duidelijk zijn dat dit de nodige voordelen met zich mee kan brengen en dat dit de kans van slagen van het projekt kan vergroten.

5. toekomst

5.4 Kosten

Hieronder wordt een schatting gegeven van de kosten van de in de toekomst uit te voeren onderzoeken (zie ook 'Voorstel modelvorming' door Frits Staals).

- experimenteren

Het probleem is dat nog niet bekend is wat en hoe er precies gemeten moet worden. Het gaat hier dus om een schatting.

- data-aquisitie kaarten	f10.000,-
- P/I omzeters (10 stuks)	f15.000,-
- Software, voor het verwerken van gegevens	f10.000,-

- simuleren

Voor het uitvoeren van simulaties zijn de volgende aspecten noodzakelijk.

- PC versie 386 (vanwege de snelheid benodigd)	f25.000,-
- Software, het programma MATLAB	f5.000,-

- afstudeerprojekt

De TUE vraagt een financiële vergoeding per afstudeerplaats. Dit bedraagt f15.000,-.

Het voordeel is echter dat er gebruik mag worden gemaakt van de faciliteiten (hardware en software) die op de TUE beschikbaar zijn. Dit leidt tot een besparing van de kosten. De software kosten en enige hardware kosten (PC 386) komen te vervallen. Een ander voordeel is natuurlijk dat er weinig of geen loonkosten voor het projekt zullen optreden.

Als besloten wordt om het onderzoek in de vorm van een afstudeerprojekt voort te zetten bedragen de totale kosten f40.000,-.

6. conclusies

6. CONCLUSIES

Daar er weinig kennis over het dynamisch gedrag van de verschillende drukken van het produktiesysteem aanwezig is moet in eerste instantie de aandacht op dit punt gevestigd worden. Door middel van het uitvoeren van metingen moet meer kennis van het produktie-systeem verkregen worden.

Om het aantal uit te voeren metingen tot een minimum te beperken is tot modelvorming van het chloor-produktieproces overgegaan. Als éénmaal een model gevonden is, wat de werkelijkheid goed benadert, kan met behulp van dit model het dynamisch gedrag van het produktie-systeem nader bepaald worden. De mogelijkheid bestaat dan ook om met behulp van het model druk-regelingen te ontwerpen en te testen.

De eerste fase van modelvorming is theoretische modelvorming. Aan de hand van fysische wetten en de proceskennis is tijdens de stage een theoretisch model gemaakt. Het theoretisch model legt ook de structuur van het uiteindelijke model vast. Het produktiesysteem is beschouwd als een systeem bestaande uit volumes, waar al dan niet een aktie plaats vindt, en weerstanden. Het is nu mogelijk om voor de drukken die in de volumes ontstaan een relatie op te stellen. Verder is het mogelijk om voor de regelsignalen relaties op te stellen. De opgestelde relaties beschrijven samen het dynamisch gedrag van het systeem.

De met het theoretisch model uitgevoerde simulaties komen trendmatig gezien met de werkelijkheid overéén.

In de toekomst moeten 2 aspecten uitgevoerd worden, namelijk het verbeteren van het theoretische model totdat het voldoende goed (maximaal 10% fout) met de werkelijkheid overéénkomt. Dit moet gebeuren aan de hand van één of meerdere confrontaties met de werkelijkheid (gevonden door metingen), en door aanpassen en uitbreiden van het theoretisch model. Uiteindelijk moet er een model gevonden worden wat het dynamisch gedrag van het systeem bij grote verstoringen (met name grote elektrische stroomverstoringen) beschrijft.

Het tweede aspect wat uitgevoerd moet worden is de eigenlijke ontwikkeling van het regelsysteem.

Bij het ontwerpen van een regeling moet naast de klassieke regeltheorie (werken in frequentie-domein) ook aandacht worden besteed aan de moderne regeltheorie (werken in tijdsdomein). Dit vergroot de kans dat er een goed regelsysteem voor het beheersen van het proces gevonden kan worden.

De kosten benodigd voor het nog uit te voeren onderzoek worden geschat op f65.000,-. Als het onderzoek in de vorm van een afstudeerprojekt wordt voortgezet bedragen de kosten f40.000,-.

6. conclusies

Voortzetting van het onderzoek in de vorm van een afstudeerproject heeft voordelen (ook financiële). Er kan nu gebruik worden gemaakt van de kennis en faciliteiten van de vakgroep Fundamentele Werktuigkunde van de TUE. Ik hoop dan ook het onderzoek in de vorm van een afstudeerproject voort te zetten.

bijlagen

DE BIJLAGEN

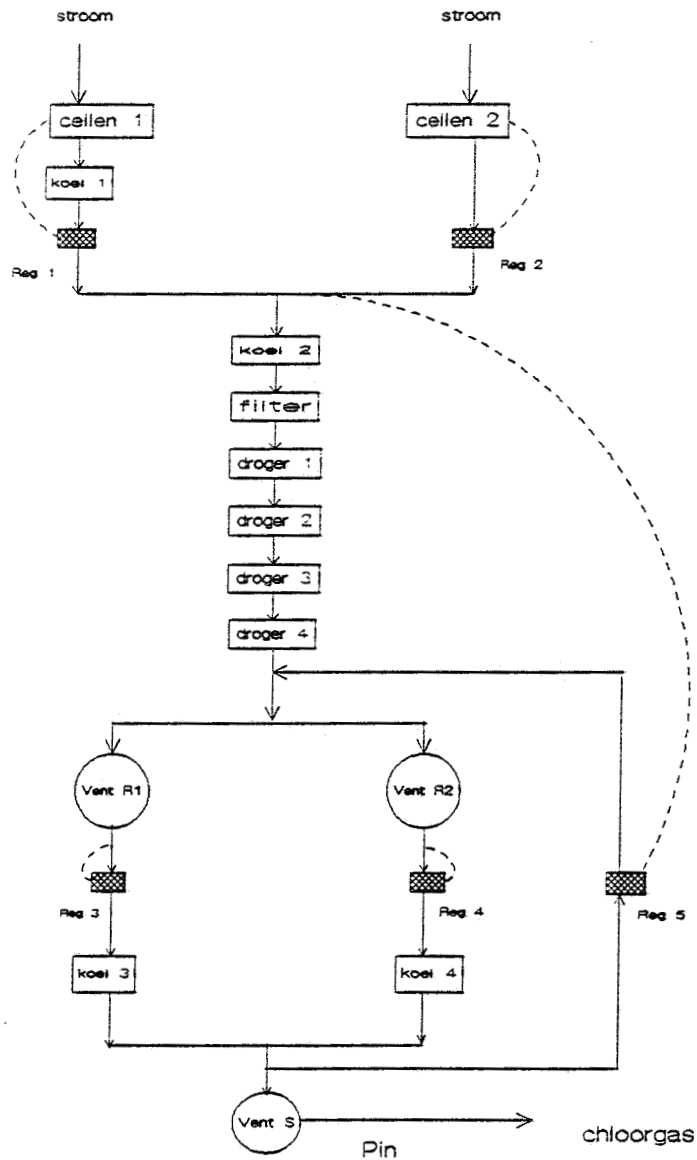
stagerapport TUE, Solvay

BIJLAGE 1

In deze bijlage wordt een overzicht van het Cl₂-produktieproces gegeven dat voor de modelvorming beschouwd wordt, en worden de eigenschappen van de componenten beschreven. In deze bijlage zijn alle relevante gegevens en eigenschappen die van het systeem bekend zijn weergegeven. Met deze gegevens en eigenschappen is het theoretische model opgezet.

Het produktieproces

Hieronder is het produktieproces schematisch weergegeven.



bijlage 1

Opmerking: componenten die als noodvoorziening in het systeem zijn opgenomen, zijn niet in het schema opgenomen.

Beschrijving van de componenten.

Cellen 1

In de cellen vindt de elektrolyse plaats. Cellen 1 staan voor de cellen in zaal 1.

eigenschappen: - er zijn 54 cellen.
- intern volume = 64.8 m³.

Cellen 2

Cellen 2 staat voor de cellen in zaal 2.

eigenschappen: - er zijn 64 cellen (4 etages).
- intern volume = 138.2 m³.

Koeler 1

De koeler verlaagt de temperatuur van het gas met 50 K (bij het normale produktieniveau).

eigenschappen: - intern volume = 10 m³.

Koeler 2

De koeler verlaagt de temperatuur van het gas met 40 K.

eigenschappen: - er zijn meerdere koelers.
- intern volume = 24 m³.

Koeler 3 en Koeler 4

De koeler verlaagt de temperatuur van het gas met 75 K.

eigenschappen: - intern volume = 4.6 m³ (per koeler).

Droger 1 tm. Droger 4

De drogers hebben als taak om het overgebleven water in het chloor-gas te verwijderen. Dit is een chemisch proces.

eigenschappen: - intern volume = 26.6 m³ (per droger).

Vent R1 en Vent R2

De 2 Rateau ventilatoren zuigen het geproduceerde gas uit de cellen door het Cl₂-circuit.

eigenschappen: - bij het normale produktieniveau ($\Delta P = 72$ KPa) wordt er 0.9 m³/s Cl₂-gas aangezogen.
- bij een ΔP van 80 KPa wordt er 0.8 m³/s aangezogen.
- bij een ΔP van 60 KPa wordt er 1.0 m³/s aangezogen.

Vent S

De Schielle ventilator zuigt het gas wat zich achter de Rateau-ventilatoren bevindt aan.

eigenschappen: - bij het normale produktieniveau ($\Delta P = 20$ KPa) wordt er $1.43 \text{ m}^3/\text{s}$ aangezogen (gelijk aan geproduceerde hoeveelheid).
- bij een ΔP van 15 KPa wordt er $2.2 \text{ m}^3/\text{s}$ aangezogen.

Filter

Het filter zuivert het Cl_2 -gas

eigenschappen: - intern volume = 35 m^3 .

Verder zijn de volumes van de leidingen die de verschillende componenten met elkaar verbinden van belang. Hieronder volgen de volumes.

- volume leiding van Cellen 1 naar Koeler 1 = 8 m^3 .
- volume leiding van Koeler 1 naar Koeler 2 en van Cellen 2 naar Koeler 2 = 17.2 m^3 .
- volume verbindingsleidingen in Koeler 2 = 2.67 m^3 .
- volume leiding van Koeler 2 naar het filter = 9.2 m^3 .
- volume leiding van het Filter naar Droger 1 = 2.23 m^3 .
- volume leidingen tussen de drogers = 8.27 m^3 .
- volume leidingen van Droger 4 tot aan de Vent R1 en Vent R2 = 9.2 m^3 .
- volume leiding van Vent R1 tot Koeler 3 = 4.6 m^3 .
- volume leiding van Vent R2 tot Koeler 4 = 4.6 m^3 .
- volume leiding van Koeler 3 en Koeler 4 tot Vent S = 1.3 m^3 .
- volume van de bypassleiding = 8.2 m^3 .

De regelaars

De regelaars hebben als voornaamste taak om het ontsnappen van Cl_2 -gas tegen te gaan. Het systeem moet door de regelaars (van Cellen tot Vent R1 en Vent R2) op onderdruk gehouden worden. Bij optredende lekkage kan er dan geen Cl_2 -gas uit het systeem ontsnappen.

De regelaars moeten de bijbehorende kleppen zodanig aansturen dat de door de regelaar gemeten druk (in schema aangegeven met ---) overeenkomt met de gewenste druk.

regelaar Reg 1

- beheerst de onderdruk in Cellen 1.
- instellingen: (zie ook de symbolenlijst achterin)

$$H = k(1 + \frac{1}{\tau_i s})$$

$k = 1.33$, $\tau_i = 12$ sec.

regelaar Reg 2

- beheerst de onderdruk in zaal 2 (Cellen 2). In zaal 2 wordt per etage de druk geregeld, er zijn 4 regelaars werkzaam. In eerste instantie wordt zaal 2 als één geheel gezien en worden de instellingen van de regelaars gemiddeld.
- instellingen: $k = 2/3$, $\tau_i = 42$ sec.

regelaar Reg 3

- beheerst de druk achter Vent R1.
- instellingen: $k = 4/7$, $\tau_i = 60$ sec.

regelaar Reg 4

- beheerst de druk achter Vent R2.
- instellingen: $k = 1$, $\tau_i = 42$ sec.

regelaar Reg 5

Deze regeling kan beschouwd worden als de hoofdregeling. Afhankelijk van de gemeten druk in de verzamelleiding wordt de klep in de bypassleiding gestuurd. Als de druk in de verzamelleiding te groot is wordt de klep dicht gestuurd. Het gevolg hiervan is dat de ventilatoren Vent R1 en Vent R2 meer gas uit het systeem zuigen. De druk in de verzamelleiding zal dus dalen.

- Reg 5 beheerst de druk in de verzamelleiding achter Koeler 1 en Cellen 2.
- instellingen:

$$H = k(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s)$$

$k = 2/3$, $\tau_i = 36$ sec., $\tau_d = 0.9$ sec.

bijlage 1

Gegevens over de gassen

In de cellen ontstaat door elektrolyse Cl_2 -gas en door verdamping H_2O -gas. Hieronder volgen enige relevante gegevens van deze gassen.

Cl_2

- is giftig.
- soortelijke massa in gasvorm = 3.17 kg/m^3 (bij 288 K en 1 bar).
- soortelijke massa in vloeibarevorm = 1.56 kg/l .
- 1 liter vloeistof = 497.7 liter gas.
- $R_{\text{Cl}} = R/M$ (= gasconstante/molair gewicht) = 117 J/kgK .
($R = 8314.4 \text{ J/kmol.K}$ en $M = 71 \text{ kg/kmol}$)

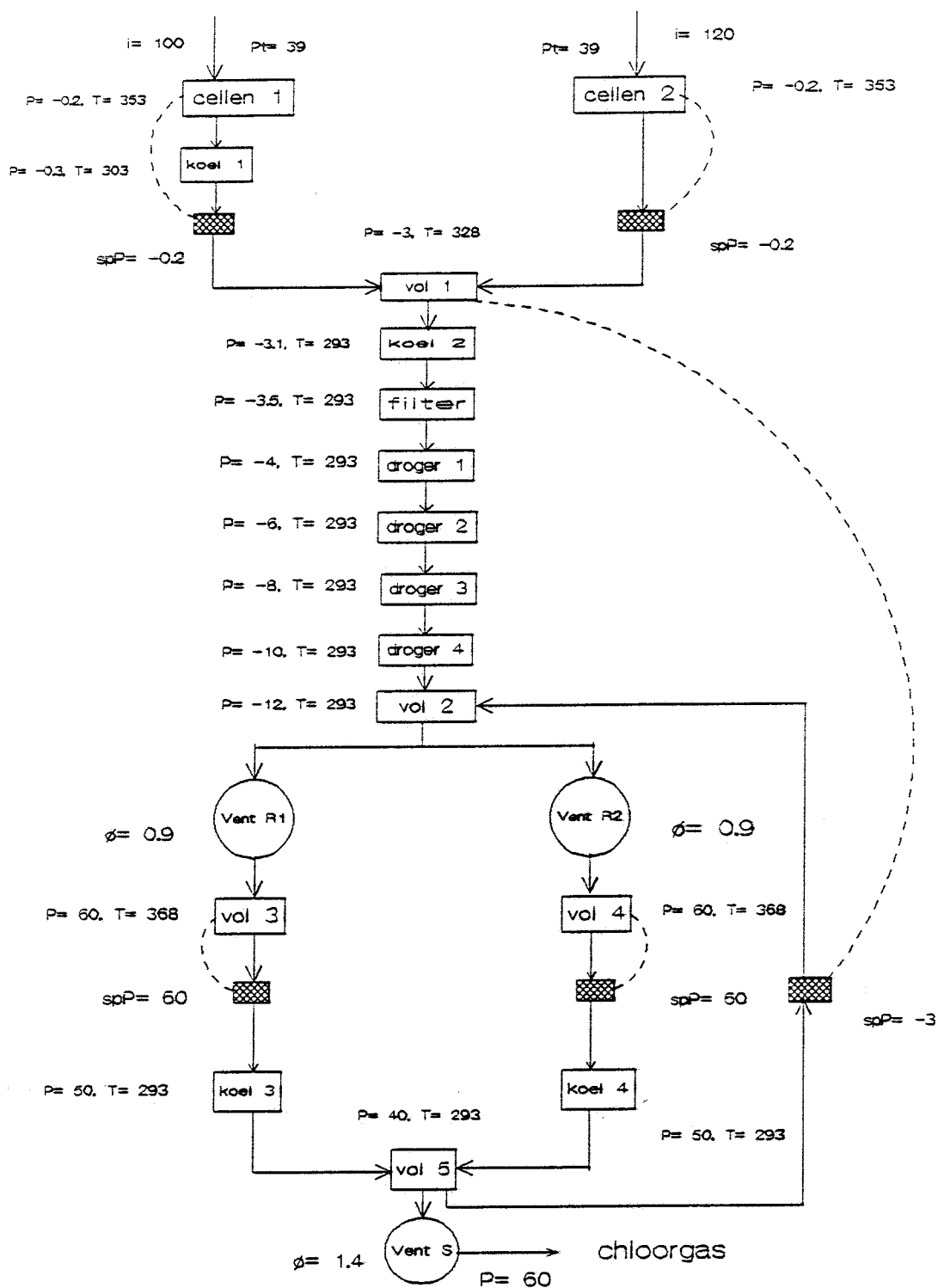
H_2O

- soortelijke massa in gasvorm = 0.79 kg/m^3 (bij 288 K en 1 bar).
- soortelijke massa in vloeibarevorm = 1 kg/l .
- 1 liter vloeistof = 1260 liter gas.
- $R_w = 461.9 \text{ J/kgK}$.
($R = 8314.4 \text{ J/kmol.K}$ en $M = 18 \text{ kg/kmol}$)

De Chloorproduktie

Bij het normale produktieniveau wordt 390 ton vloeibaar Chloor per dag geproduceerd. Door Cellen 1, waar per dag 162 ton geproduceerd wordt, wordt bij dit produktieniveau 100 kA geleid, en door Cellen 2 120 kA. De drukken en temperaturen die zich bij het normale produktieniveau instellen zijn op de volgende bladzijde gegeven.

bijlage 1



Het normale produktieniveau

bijlage 1

Enige opmerkingen behorend bij het schema van de vorige bladzijde:

De vermelde over- en onderdrukken (P) zijn in kPa weergegeven. De temperaturen (T) zijn in Kelvin weergegeven, en de flow (ϕ) in m^3/s .

Het schema wijkt iets af van het eerder getoonde schema. In dit schema zijn enige volumes expliciet in het schema opgenomen. Er zal blijken dat dit voor de modelvorming benodigd is.

De ingangen op het systeem zijn i (elektrische stroom), Pt (dampspanning), P_{in} (druk achter Vent S) en de setpoints van de regelaars.

De dampspanning is afhankelijk van de temperatuur van de zoutoplossing. De dampspanning bepaalt de mate van H_2O vorming. Bij het normale produktieniveau zal volgens de technologen van Solvay ongeveer evenveel H_2O -gas als Cl_2 -gas ontstaan (in volumestromen).

P_{in} is afhankelijk van het produktieproces na de Vent S. Voorlopig wordt dit produktieproces van het vloeibaar maken van chloor niet beschouwd.

BIJLAGE 2

MODELFORMING VAN HET CHLOORPRODUKTIEPROCES

In deze bijlage wordt beschreven hoe de theoretische modelvorming van het chloorproduktieproces is uitgevoerd.

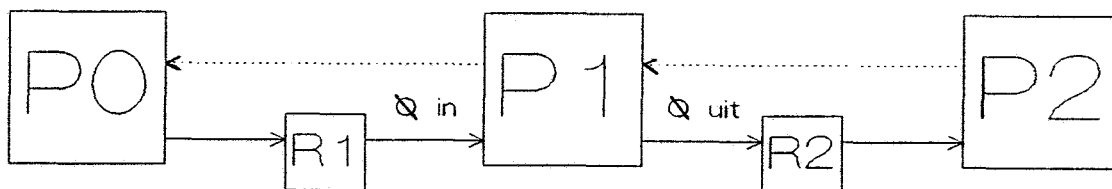
B2.1 Het produktieproces

In bijlage 1 is dat deel van het produktieproces weergegeven waar de modelvorming betrekking op heeft. Dit is een gedeelte van het chloorproduktieproces. In bijlage 1 zijn de eigenschappen van de componenten die in het systeem voorkomen beschreven.

B2.2 Modelvorming

Voor de modelvorming worden de componenten van het systeem als volumes beschouwd waarin al dan niet een aktie plaatsvindt. De verbindingsleidingen worden als weerstanden beschouwd. Het is nu mogelijk om de druk in een volume in een aantal grootheden uit te drukken. Er geldt:

Rg1. V1, T1, m1



$$m_1(t) = \int_0^t (\phi_i - \phi_u) dt + m_1(0) + \text{eventuele produktie}$$

$$\phi_i = \frac{P_0 - P_1}{R_1} \quad \text{en} \quad \phi_u = \frac{P_1 - P_2}{R_2}$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = m_1 R g_1 \quad \Rightarrow \quad P_1 = \frac{m_1 R g_1 T_1}{V_1}$$

Voor de betekenis van de symbolen zie de symbolenlijst (achterin).

De opgestelde relaties moeten uiteindelijk in een model worden opgenomen. Met het model moeten simulaties met het programma MATLAB, wat op de TUE beschikbaar is, uitgevoerd worden. Om simulaties uit te voeren is het praktisch om de relaties in de volgende vorm in te voeren:

$$\dot{x} = f(x, u, t)$$

x= een toestandsgrootte (b.v. de druk).
 u= een ingang (b.v. de elektrische stroom).
 t= de tijd.

De gevonden relatie voor P_1 wordt nu ook in de beoogde vorm geschreven. Er wordt verondersteld dat de temperatuur en het volume konstant is. Er geldt:

$$\dot{P}_1 = \frac{R g_1 T_1}{V_1} \dot{m}_1 \quad \text{en} \quad \dot{m}_1 = \phi_i - \phi_u$$

Dus:

$$\dot{P}_1 = \frac{R g_1 T_1}{V_1} \left(\left(\frac{P_0 - P_1}{R_1} \right) - \left(\frac{P_1 - P_2}{R_2} \right) \right)$$

Door nu voor alle componenten in het systeem een dergelijke relatie op te stellen (rekening houdend met de eigenschappen van de componenten) ontstaat uiteindelijk een stelsel differentiaal vergelijkingen (d.v.'s) van de volgende vorm.

$$\dot{x} = f(x, u)$$

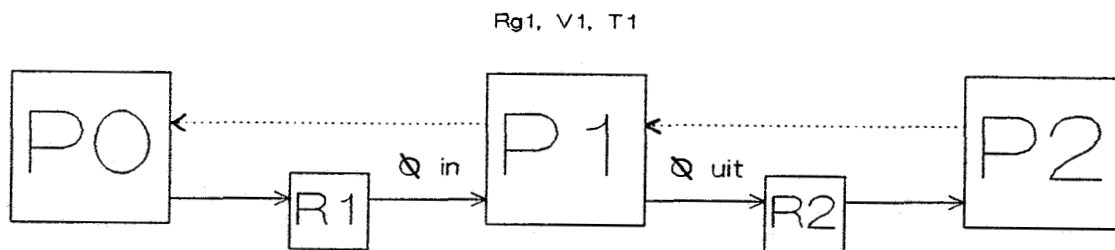
\dot{x} , x en u zijn vektoren.

Hieronder worden de d.v.'s die betrekking hebben op de verschillende componenten van het produktiesysteem weergegeven.

1) Drogers, filters, volumes

Er wordt verondersteld dat in deze componenten de druk en temperatuur t.g.v. de bewerking die in een component wordt uitgevoerd niet verandert.

Er geldt:



$$\dot{P}_1 = \frac{Rg_1 T_1}{V_1} \left(\left(\frac{P_0 - P_1}{R_1} \right) - \left(\frac{P_1 - P_2}{R_2} \right) \right)$$

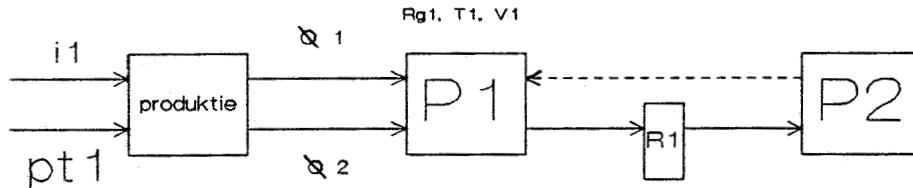
Enige opmerkingen:

- voor V_1 wordt het volume van de component + het volume van de verbindingsleiding naar de component genomen (dit zal overal gebeuren).
- Rg_1 kan aan de hand van de (globaal) bekende samenstelling van het gas berekend worden.

2) Cellen

In de cellen wordt via elektrolyse Cl_2 -gas gevormd en via verdamping H_2O -gas gevormd.

Er geldt:



$$\phi_1 = K_1 i_1$$

K_1 geeft het lineaire verband tussen ingaande elektrische stroom en het geproduceerde Cl_2 -gas.

Verder geldt:

$$\phi_2 = \alpha (P_1 - PT_1)$$

Afhankelijk van de dampspanning en de heersende druk in de cellen zal er een hoeveelheid H_2O ontstaan. De grootte α legt deze niet lineaire relatie vast.

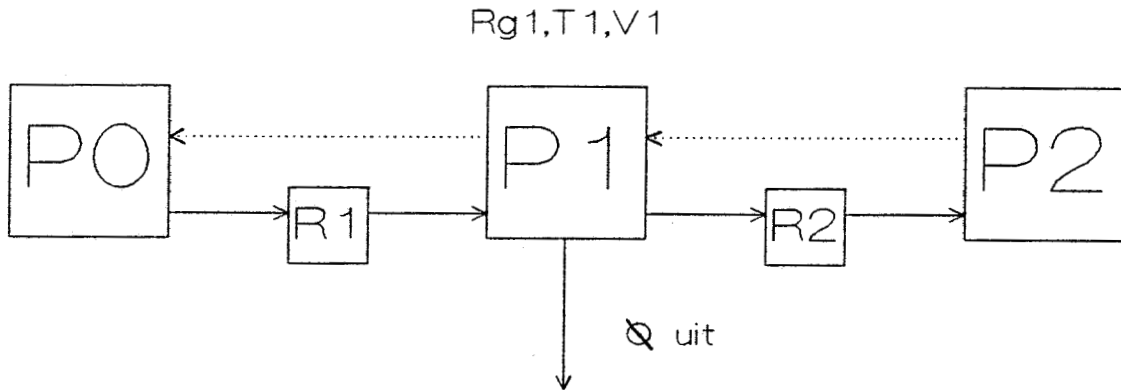
Er geldt:

$$\dot{P}_1 = Rg_1 \frac{T_1}{V_1} \left(\frac{R_{cl}}{Rg_1} K_1 i_1 + \alpha \frac{R_w}{Rg_1} (P_1 - PT_1) - \left(\frac{P_1 - P_2}{R_1} \right) \right)$$

Opmerking : R_{cl} gasconstante van Cl_2 , R_w gasconstante van H_2O en Rg_1 gasconstante van het mengsel.

3) Koelers

Ten gevolge van de koeling van het gas zal een gedeelte van het H₂O-gas condenseren. Dit levert een extra uitgaande stroom (ϕ_{uit}). Er geldt:

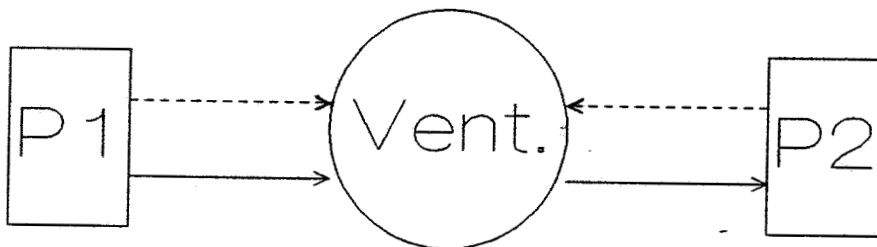


$$\dot{P}_1 = \frac{Rg_1 T_1}{V_1} \left(\left(\frac{P_0 - P_1}{R_1} \right) - \left(\frac{P_1 - P_2}{R_2} \right) \right) - \frac{R_w T_1}{V_1} \phi_{uit}$$

Opmerking: - in eerste instantie wordt ϕ_{uit} aan de hand van de globale kennis van de technologen gekozen.
 - voor T_1 wordt de waarde van de temperatuur genomen die in de koeling heerst.

4) Ventilatoren

Afhankelijk van de druk voor en achter de ventilator zuigt de ventilator een bepaalde massaflux aan. Er geldt:



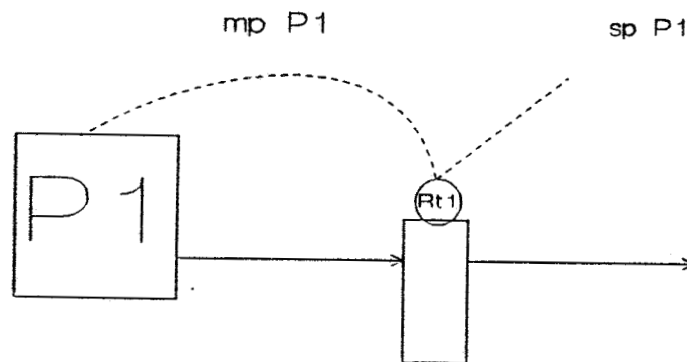
$$\phi = \beta (P_2 - P_1)$$

De grootheid β geeft het niet lineaire verband tussen de opvoerdruk en de massaflux. Dit niet lineaire verband is af te lezen in de zogenaamde ventilator-kromme.

5) Regelaars

De regelaars genereren signalen waarmee de bijbehorende kleppen worden aangestuurd. Hiermee wordt dus de weerstand in de verbindingsleiding gevarieerd.

Er geldt:



$$RT_1 = H_{reg}(setpointP_1 - P_1)$$

RT_1 is het regelsignaal dat door de regelaar gevormd wordt, en H_{reg} is de overbrengingsverhouding van de regelaar. Er zijn twee typen regelaars, namelijk een PI-regelaar en een PID regelaar.

Voor een PI-regelaar geldt:

$$H_{reg} = k \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right)$$

Voor een PID-regelaar geldt:

$$H_{reg} = k(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s)$$

Voor de regelsignalen RT_1 geldt nu:

PI-regelaar

$$\dot{RT}_1 = ksp\dot{P}_1 - k\dot{P}_1 + \frac{k}{\tau_i} spP_1 - \frac{k}{\tau_i} P_1$$

PID-regelaar

$$\dot{RT}_1 = ksp\dot{P}_1 - k\dot{P}_1 + \frac{k}{\tau_i} spP_1 - \frac{k}{\tau_i} P_1 + k\tau_d sP_1 - k\tau_d \ddot{P}_1$$

Enige opmerkingen:

- de grootheid s in bovenstaande formules representeert de Laplace operator ($s = d.. /dt$).
- met het regelsignaal RT_1 wordt een klep aangestuurd, het gevolg is dat er een weerstandsverandering in de leiding optreedt. De relatie tussen het regelsignaal RT_1 en de weerstandsverandering is niet bekend. In eerste instantie wordt verondersteld dat de weerstandsverandering gelijk is aan het regelsignaal.

Met behulp van de hiervoor opgestelde d.v.'s moet nu

$$\dot{x} = f(x, u)$$

bepaald worden (de coëfficiënten van de d.v.'s moeten in getalvorm bepaald worden). Er doen zich nu twee problemen voor. Ten eerste zijn enige d.v.'s niet lineair, dit is lastig voor rekenen met het model (simuleren). En ten tweede zijn een aantal grootheden alleen maar bij het normale produktieniveau (zie bijlage 1) bekend.

Door nu de opgestelde d.v.'s rondom het stationaire werkpunt van het normale produktieniveau te lineariseren kunnen bovenstaande problemen opgelost worden, en de coëfficiënten van de d.v.'s in getalvorm bepaald worden. Er ontstaat dus nu de volgende gelineariseerde toestandsvergelijking (hierin zijn alle in het systeem aanwezige componenten opgenomen).

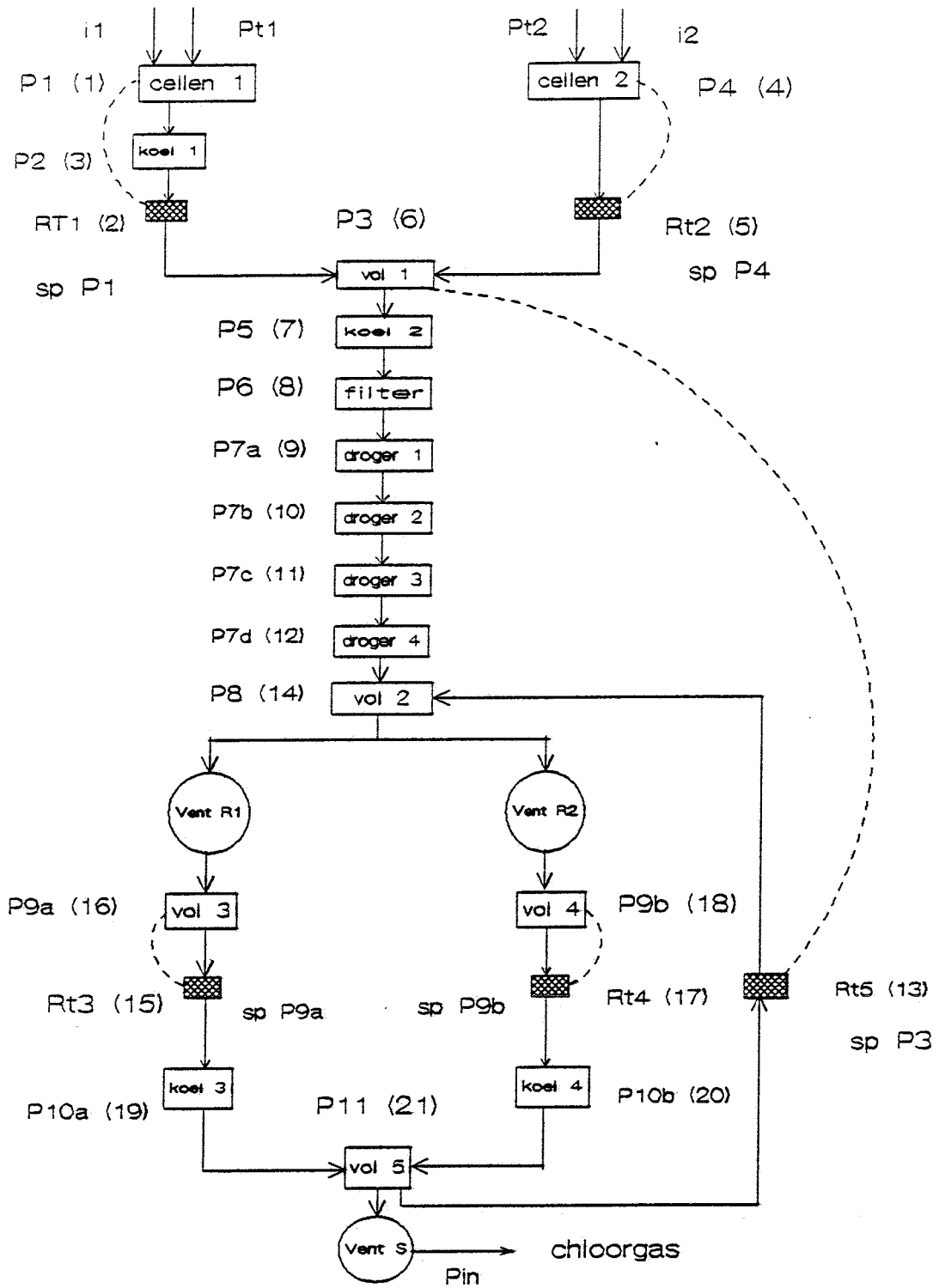
$$\Delta \dot{X} = A\Delta X + B\Delta U$$

A en B zijn matrices en $\Delta \dot{X}$, ΔX en ΔU zijn vektoren.

Δx en Δu representeren nu kleine variaties rondom het stationaire werkpunt van het normale produktieniveau. Bovenstaande toestandsvergelijking kan in het programma MATLAB ingevoerd worden. Met dit model kunnen nu simulaties van kleine verstoringen rondom het stationaire werkpunt gemaakt worden.

B3.2 Het model van het chloor-produktieproces

In deze paragraaf wordt de totstandkoming van het theoretische model van het chloor-produktieproces beschreven. Met behulp van bijlage 1 wordt nu per toestandsgrootheid de gelineariseerde differentiaalvergelijking met bijbehorende grootheden gegeven. De toestandsgrootheden en ingangen zijn in de figuur op de volgende bladzijde gegeven (zie ook het uitvouwblad achterin het verslag).



Toestandsgrootheden en ingangen.

bijlage 2

De toestanden zijn ondergebracht in de toestandsvektor ΔX . Er is gekozen voor de volgende vektor.

$$\Delta X = [\Delta P_1, \Delta Rt_1, \Delta P_2, \Delta Rt_2, \Delta P_4, \Delta P_3, \Delta P_5, \Delta P_6, \Delta P_{7a}, \Delta P_{7b}, \Delta P_{7c}, \Delta P_{7d}, \Delta Rt_5, \Delta P_8, \Delta Rt_4, \Delta P_{9a}, \Delta Rt_5, \Delta P_{9b}, \Delta P_{10a}, \Delta P_{10b}, \Delta P_{11}]$$

De ingangen zijn ondergebracht in de volgende ingangsvektor

$$\Delta U = [\Delta i_1, \Delta Pt_1, \Delta spP_1, \Delta spP_4, \Delta i_2, \Delta PT_2, \Delta spP_3, \Delta spP_{9a}, \Delta spP_{9b}, \Delta P_i]$$

TOESTANDSGROOTHEID 1 \rightarrow ΔP_1

$$\Delta \dot{P}_1 = \frac{R_{cl}T_1 k_{1a}}{V_1} \Delta i_1 + \left(\frac{\alpha_1 R_w T_1}{V_1} - \frac{Rg_1 T_1}{V_1 R_1} \right) \Delta P_1 + \frac{Rg_1 T_1}{V_1 R_1} \Delta P_2 - \frac{\alpha_1 R_w T_1}{V_1} \Delta Pt_1$$

$Rg_1 = 200$, $T_1 = 353$, $V_1 = 64.8$, $\alpha_1 = -0.000012$, $k_{1a} = 0.01875$,
 $R_1 = 42.5$, $R_w = 462$, $R_{cl} = 117$, $Rg_1 = 200$.

Opmerkingen:

- Voor de betekenis van de grootheden en de bijbehorende eenheden zie de symbolenlijst (achterin).
- Er wordt verondersteld dat T_1 en Rg_1 constant blijven (ΔT_1 en $\Delta Rg_1 = \text{nul}$). Dit is van belang voor het lineariseren van de vergelijking. Bij alle nog komende vergelijkingen zal deze veronderstelling gelden.

TOESTANDSGROOTHEID 2 \rightarrow ΔRt_1

$$\Delta \dot{Rt}_1 = -k_1 \Delta \dot{P}_1 + \frac{k_1}{\tau_1} \Delta spP_1 - \frac{k_1}{\tau_1} \Delta P_1$$

$k_1 = 4/3$, $\tau_1 = 12$.

opmerking: - $\Delta sp\dot{P}_1 = 0$ (dit wordt ook bij de andere regelaars verondersteld).

TOESTANDSGROOTHEID 3 → ΔP_2

$$\begin{aligned} \Delta \dot{P}_2 = & \frac{Rg_2 T_2}{V_2 R_1} \Delta P_1 - \frac{Rg_2 T_2}{V_2 R_1} \Delta P_2 - \frac{Rg_2 T_2}{V_2} \left(\frac{\Delta P_2 - \Delta P_3}{Rnr_1} \right) \\ & - \frac{Rg_2 T_2}{V_2} \left(\frac{-P_2 + P_3}{(Rnr_1)^2} \right) \Delta R t_1 \\ & - 0,5 \alpha_1 \frac{R_w T_2}{V_2} \Delta P_1 + 0,5 \alpha_1 \frac{R_w T_2}{V_2} \Delta P T_1 \end{aligned}$$

$Rnr_1 = 1324$, $Rg_2 = 150$, $T_2 = 303$, $V_2 = 10$.

Opmerkingen:

- lineariseren van de term:

$$\frac{(P_2 - P_3)}{Rnr_1}$$

leidt tot:

$$\frac{\Delta P_2 - \Delta P_3}{Rnr_1} + \frac{-P_2 + P_3}{(Rnr_1)^2} \Delta R t_1$$

Rnr_1 = weerstand regelklep als $\Delta R t_1$ gelijk is aan nul.

- ten gevolge van de koeling condenseert de helft van de in Cellen 1 geproduceerde waterdamp.

TOESTANDSGROOTHEID 4 → $\Delta R t_2$

$$\Delta \dot{R} t_2 = -k_2 \dot{P}_4 + \frac{k_2}{\tau_2} \Delta s p P_4 - \frac{k_2}{\tau_2} \Delta P_4$$

$k_2 = 2/3$, $\tau_2 = 30$.

bijlage 2

TOESTANDSGROOTHEID 5 → ΔP_4

$$\Delta \dot{P}_4 = \frac{R_{cl} T_4}{V_4} k_{2a} \Delta i_2 + \frac{T_4 R_w}{V_4} \alpha_2 \Delta P_4 - \frac{T_4 R_w}{V_4} \alpha_2 \Delta P t_2 + \frac{R g_4 T_4}{V_4} \left(\frac{-\Delta P_4 + \Delta P_3}{R n r_2} + \frac{P_4 - P_3}{(R n r_2)^2} \Delta R t_2 \right)$$

$k_{2a} = 2.66/120$, $T_4 = 353$, $V_4 = 138.2$, $R g_4 = 185$, $\alpha_2 = -0.0000175$, $R n r_2 = 838$.

TOESTANDSGROOTHEID 6 → ΔP_3

$$\Delta \dot{P}_3 = \frac{R g_3 T_3}{V_3} \left(\frac{\Delta P_4 - \Delta P_3}{R n r_2} + \frac{-P_4 + P_3}{(R n r_2)^2} \Delta R t_2 \right) + \frac{R g_3 T_3}{V_3} \left(\frac{\Delta P_2 - \Delta P_3}{R n r_1} + \frac{-P_2 + P_3}{(R n r_1)^2} \Delta R t_1 \right) - \frac{R g_3 T_3}{V_3 R_5} \Delta P_3 + \frac{R g_3 T_3}{V_3 R_5} \Delta P_5 - 0,25 \alpha_1 \frac{R_w T_3}{V_3} \Delta P_1 + 0,25 \alpha_1 \frac{R_w T_3}{V_3} \Delta P t_1 - 0,5 \alpha_2 \frac{R_w T_3}{V_3} \Delta P_4 + 0,5 \alpha_2 \frac{R_w T_3}{V_3} \Delta P t_2$$

$T_3 = 328$, $V_3 = 17.2$, $R g_3 = 170$, $R_5 = 18$.

Opmerking: - In deze component condenseert 25% van de waterdamp uit cellen 1 en 50% van de waterdamp uit cellen 2.

TOESTANDSGROOTHEID 7 → ΔP_5

$$\Delta \dot{P}_5 = \frac{R g_5 T_5}{V_5 R_5} \Delta P_3 - \frac{R g_5 T_5}{V_5 R_5} \Delta P_5 - \frac{R g_5 T_5}{V_5 R_6} \Delta P_5 + \frac{R g_5 T_5}{V_5 R_6} \Delta P_6 - 0.25 \alpha_1 R_w \frac{T_5}{V_5} \Delta P_1 + 0.25 \alpha_1 \frac{R_w T_5}{V_5} \Delta P t_1 - 0.5 \alpha_2 \frac{R_w T_5}{V_5} \Delta P_4 + 0.5 \alpha_2 \frac{R_w T_5}{V_5} \Delta P t_2$$

$V_5 = 26.7$, $T_5 = 393$, $R_6 = 88$, $R g_5 = 140$.

Opmerking: - In deze koeler condenseert alle nog aanwezige waterdamp.

TOESTANDSGROOTHEID 8 → ΔP_6

$$\Delta \dot{P}_6 = \frac{R_{cl} T_6}{V_6 R_6} \Delta P_5 - \frac{R_{cl} T_6}{V_6 R_6} \Delta P_6 - \frac{R_{cl} T_6}{V_6 R_{7a}} \Delta P_6 + \frac{R_{cl} T_6}{V_6 R_{7a}} \Delta P_{7a}$$

$$T_6 = 293, V_6 = 44.2, R_{7a} = 110, R_{cl} = 117.$$

TOESTANDSGROOTHEID 9 → ΔP_{7a}

$$\Delta \dot{P}_{7a} = \frac{R_{cl} T_{7a}}{V_{7a} R_{7a}} \Delta P_6 - \frac{R_{cl} T_{7a}}{V_{7a} R_{7a}} \Delta P_{7a} - \frac{R_{cl} T_{7a}}{V_{7a} R_{7b}} \Delta P_{7a} + \frac{R_{cl} T_{7a}}{V_{7a} R_{7b}} \Delta P_{7b}$$

$$R_{7b} = 440, V_{7a} = 22.8, T_{7a} = 293.$$

TOESTANDSGROOTHEID 10 → ΔP_{7b}

$$\Delta \dot{P}_{7b} = \frac{R_{cl} T_{7b}}{V_{7b} R_{7b}} \Delta P_{7a} - \frac{R_{cl} T_{7b}}{V_{7b} R_{7b}} \Delta P_{7b} - \frac{R_{cl} T_{7b}}{V_{7b} R_{7c}} \Delta P_{7b} + \frac{R_{cl} T_{7b}}{V_{7b} R_{7c}} \Delta P_{7c}$$

$$R_{7c} = 440, V_{7b} = 22.8, T_{7b} = 293.$$

TOESTANDSGROOTHEID 11 → ΔP_{7c}

$$\Delta \dot{P}_{7c} = \frac{R_{cl} T_{7c}}{V_{7c} R_{7c}} \Delta P_{7b} - \frac{R_{cl} T_{7c}}{V_{7c} R_{7c}} \Delta P_{7c} - \frac{R_{cl} T_{7c}}{V_{7c} R_{7d}} \Delta P_{7c} + \frac{R_{cl} T_{7c}}{V_{7c} R_{7d}} \Delta P_{7d}$$

$$R_{7d} = 440, T_{7c} = 293, V_{7c} = 22.8.$$

bijlage 2

TOESTANDSGROOTHEID 12 → ΔP_{7d}

$$\Delta \dot{P}_{7d} = \frac{R_{c1} T_{7d}}{V_{7d} R_{7d}} \Delta P_{7c} - \frac{R_{c1} T_{7d}}{V_{7d} R_{7d}} \Delta P_{7d} - \frac{R_{c1} T_{7d}}{V_{7d} R_8} \Delta P_{7d} + \frac{R_{c1} T_{7d}}{V_{7d} R_8} \Delta P_8$$

$$R_8 = 440, T_{7d} = 293, V_{7d} = 22.8.$$

TOESTANDSGROOTHEID 13 → ΔR_{tt_5}

$$\Delta \dot{R}_{tt_5} = -k_5 \Delta \dot{P}_3 + \frac{k_5}{\tau_5} \Delta s P_3 - \frac{k_5}{\tau_5} \Delta P_3 - k_5 \tau_{d_5} \Delta \ddot{P}_3$$

$$k_5 = -2/3, \tau_5 = 36, \tau_{d_5} = 0.9$$

TOESTANDSGROOTHEID 14 → ΔP_8

$$\Delta \dot{P}_8 = \frac{R_{c1} T_8}{V_8 R_8} \Delta P_{7d} - \frac{R_{c1} T_8}{V_8 R_8} \Delta P_8 + \frac{R_{c1} T_8}{V_8} \left(\frac{\Delta P_{11} - \Delta P_8}{Rnr_5} + \frac{-P_{11} + P_8}{(Rnr_5)^2} \Delta R_{t_5} \right) + \frac{R_{c1} T_8}{V_8} (-\alpha_v \Delta P_{9a} + \alpha_v \Delta P_8 - \alpha_v \Delta P_{9b} + \alpha_v \Delta P_8)$$

$$V_8 = 9.2, T_8 = 293, \alpha_v = -0.00003, Rnr_5 = 44828.$$

TOESTANDSGROOTHEID 15 → ΔR_{t_3}

$$\Delta \dot{R}_{t_3} = -k_3 \Delta \dot{P}_{9a} + \frac{k_3}{\tau_3} \Delta s P_{9a} - \frac{k_3}{\tau_3} \Delta P_{9a}$$

$$k_3 = 4/7, \tau_3 = 60.$$

bijlage 2

TOESTANDSGROOTHEID 16 → ΔP_{9a}

$$\Delta \dot{P}_{9a} = \frac{R_{cl} T_{9a}}{V_{9a}} \alpha_v \Delta P_{9a} - \frac{R_{cl} T_{9a}}{V_{9a}} \alpha_v \Delta P_8 + \frac{R_{cl} T_{9a}}{V_{9a}} \left(\frac{-\Delta P_{9a} + \Delta P_{10a}}{Rnr_3} + \frac{P_{9a} - P_{10a}}{(Rnr_3)^2} \Delta R t_3 \right)$$

$$V_{9a} = 1.7, T_{9a} = 363, Rnr_3 = 3509.$$

TOESTANDSGROOTHEID 17 → $\Delta R t_4$

$$\Delta \dot{R} t_4 = -k_4 \Delta \dot{P}_{9b} + \frac{k_4}{\tau_4} \Delta S P_{9b} - \frac{k_4}{\tau_4} \Delta P_{9b}$$

$$k_4 = 1, \tau_4 = 42.$$

TOESTANDSGROOTHEID 18 → ΔP_{9b}

$$\Delta \dot{P}_{9b} = \frac{R_{cl} T_{9b}}{V_{9b}} \alpha_v \Delta P_{9b} - \frac{R_{cl} T_{9b}}{V_{9b}} \alpha_v \Delta P_8 + \frac{R_{cl} T_{9b}}{V_{9b}} \left(\frac{-\Delta P_{9b} + \Delta P_{10b}}{Rnr_4} + \frac{P_{9b} - P_{10b}}{(Rnr_4)^2} \Delta R t_4 \right)$$

$$V_{9b} = 1.7, T_{9b} = 363, Rnr_4 = 3509$$

TOESTANDSGROOTHEID 19 → ΔP_{10a}

$$\Delta \dot{P}_{10a} = \frac{R_{cl} T_{10a}}{V_{10a}} \left(\frac{\Delta P_{9a} - \Delta P_{10a}}{Rnr_3} + \frac{-P_{9a} + P_{10a}}{(Rnr_3)^2} \Delta R t_3 \right) - \frac{R_{cl} T_{10a}}{V_{10a} R_{11a}} \Delta P_{10a} + \frac{R_{cl} T_{10a}}{V_{10a} R_{11a}} \Delta P_{11}$$

$$V_{10a} = 7.5, T_{10a} = 322, R_{11a} = 3509.$$

bijlage 2

TOESTANDSGROOTHEID 20 → ΔP_{10b}

$$\Delta \dot{P}_{10b} = \frac{R_{cl} T_{10b}}{V_{10b}} \left(\frac{\Delta P_{9b} - \Delta P_{10b}}{Rn r_4} + \frac{-P_{9b} + P_{10b}}{(Rn r_4)^2} \Delta R t_4 \right) - \frac{R_{cl} T_{10b}}{V_{10b} R_{11b}} \Delta P_{10b} + \frac{R_{cl} T_{10b}}{V_{10b} R_{11b}} \Delta P_{11}$$

$$V_{10b} = 7.5, T_{10b} = 322, R_{11b} = 3509.$$

TOESTANDSGROOTHEID 21 → ΔP_{11}

$$\Delta \dot{P}_{11} = \frac{R_{cl} T_{11}}{V_{11} R_{11a}} \Delta P_{10a} - \frac{R_{cl} T_{11}}{V_{11} R_{11a}} \Delta P_{11} + \frac{R_{cl} T_{11}}{V_{11} R_{11b}} \Delta P_{10b} - \frac{R_{cl} T_{11}}{V_{11} R_{11b}} \Delta P_{11} + \frac{R_{cl} T_{11}}{V_{11}} \alpha_{vs} \Delta P_1 - \frac{R_{cl} T_{11}}{V_{11}} \alpha_{vs} \Delta P_i + \frac{R_{cl} T_{11}}{V_{11}} \left(\frac{-\Delta P_{11} + \Delta P_8}{Rn r_5} + \frac{P_{11} - P_8}{(Rn r_5)^2} \Delta R t_5 \right)$$

$$V_{11} = 12.1, T_{11} = 293, \alpha_{vs} = -0.00052.$$

Alle hiervoor gegeven d.v.'s zijn ondergebracht in de toestand-vergelijking:

$$\Delta \dot{X} = A \Delta X + B \Delta U$$

Deze vergelijking wordt in het programma MATLAB ingevoerd. Met MATLAB kunnen nu simulaties uitgevoerd worden (zie bijlage 3).

BIJLAGE 3

Simulaties

De (analytisch) gelineariseerde toestandsvergelijking kan in het programma MATLAB ingevoerd worden. Met MATLAB is het nu mogelijk om een verstoring (of verstoringen) op een ingangssignaal of toestandsgrootte aan te brengen. Het gevolg van deze verstoring wordt door het programma berekend. Nu is het dus mogelijk om het gevolg van verschillende verstoringen op alle toestandsgrootheden te bepalen.

Hierna worden enige resultaten van simulaties gegeven, achterin deze bijlage worden de resultaten besproken en zijn de programma's opgenomen waarmee deze simulaties zijn uitgevoerd.

Van de volgende situaties zijn simulaties uitgevoerd:

SITUATIE 1

- tijdsinterval = van 0 tot 450 sec. met stappen van 3 sec..
- $\Delta i_1 = 1$ (gedurende het gehele tijdsinterval).
- geen enkele regelaar is werkzaam.

SITUATIE 2

- tijdsinterval = van 0 tot 450 sec met stappen van 3 sec..
- $\Delta i_1 = 1$ (gedurende het gehele tijdsinterval).
- alle regelaars zijn werkzaam.

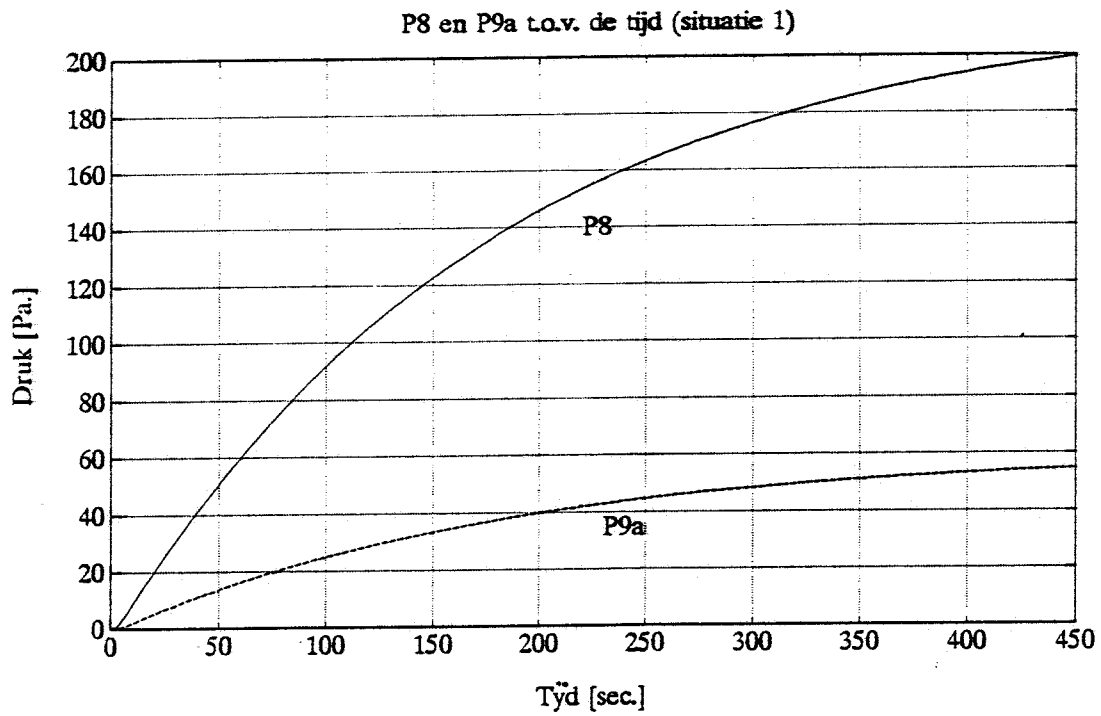
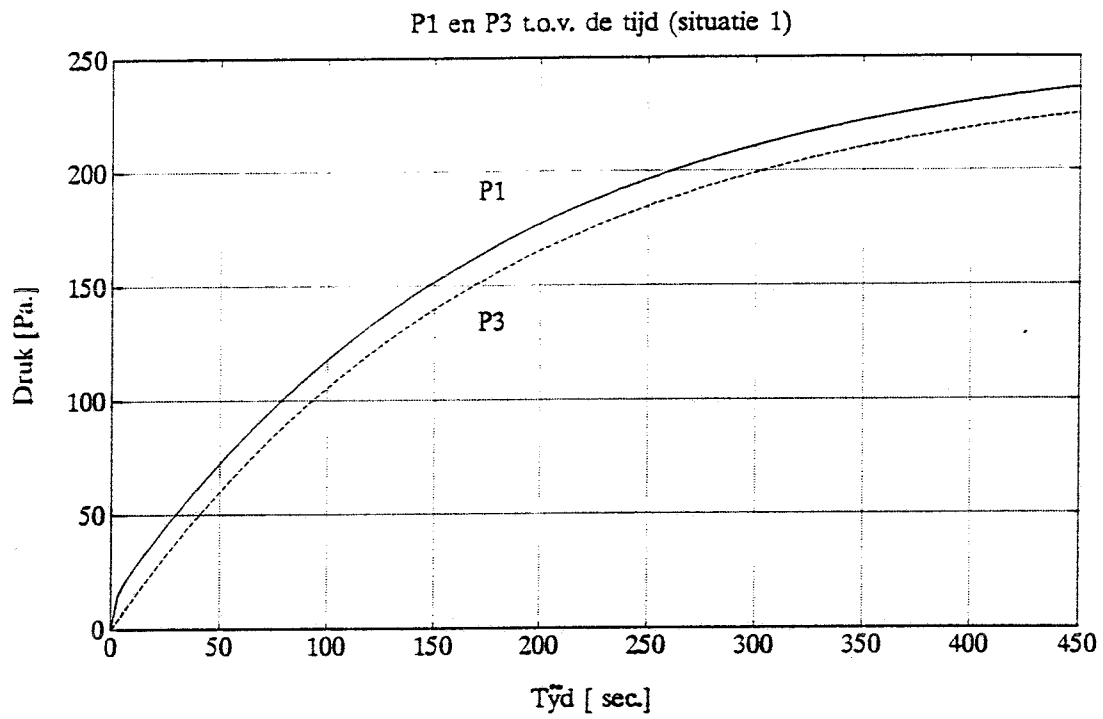
SITUATIE 3

- tijdsinterval = van 0 tot 450 sec. met stappen van 3 sec..
- $\Delta spP_1 = -10$ (gedurende het gehele tijdsinterval).
- alle regelaars zijn werkzaam.

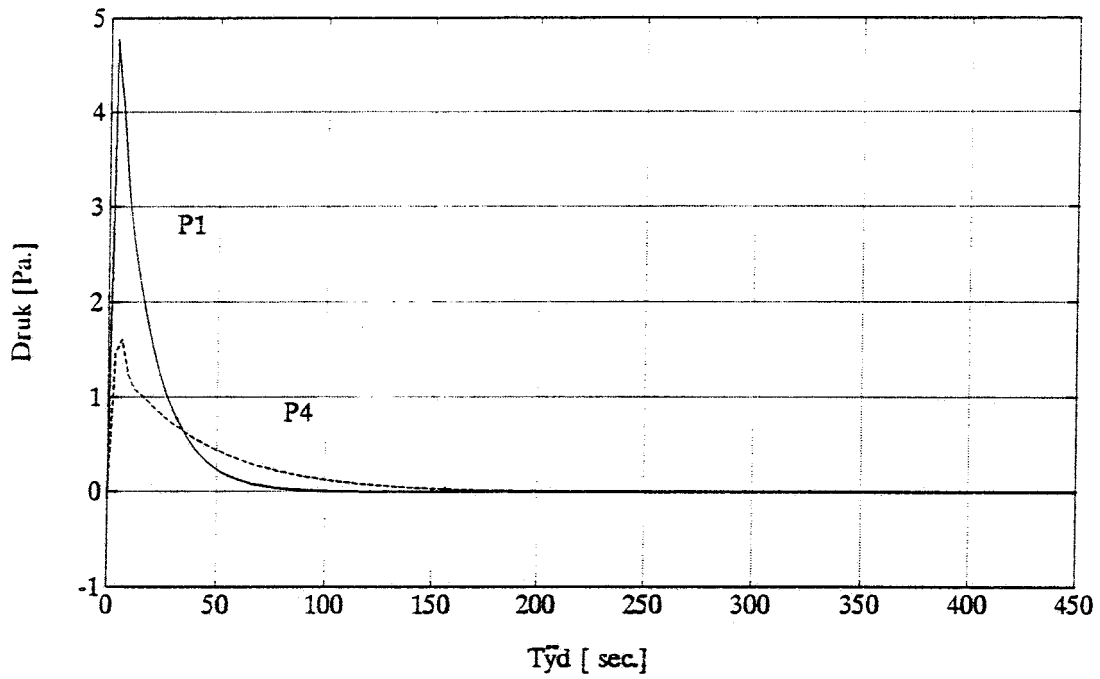
SITUATIE 4

- tijdsinterval = van 0 tot 450 sec. met stappen van 3 sec..
- $\Delta i_1 = 0$ gedurende een gedeelte van het tijdsinterval en 1 gedurende het andere gedeelte van het tijdsinterval (zie grafiek).
- alle regelaars zijn werkzaam.

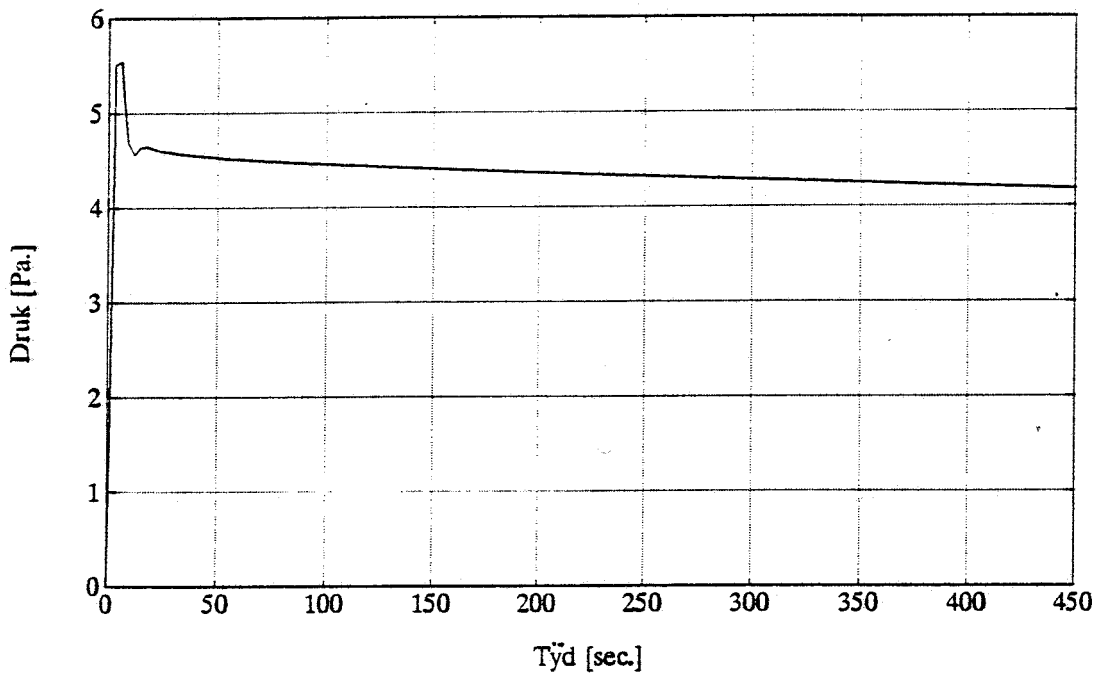
De op de volgende bladzijden getoonde grafieken geven per situatie enige drukverstoringen rondom het werkpunt van het normale produktie-niveau weer (zie ook bijlage 1 en uitvouwblad achterin).

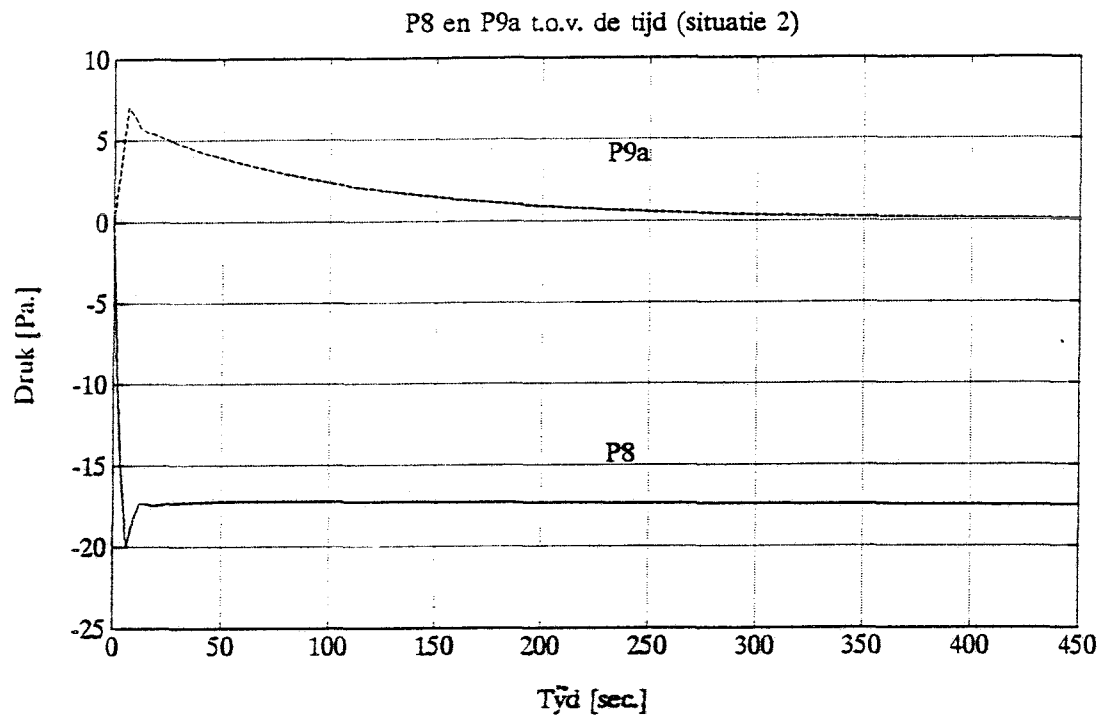


P1 en P4 t.o.v. de tijd (situatie 2)

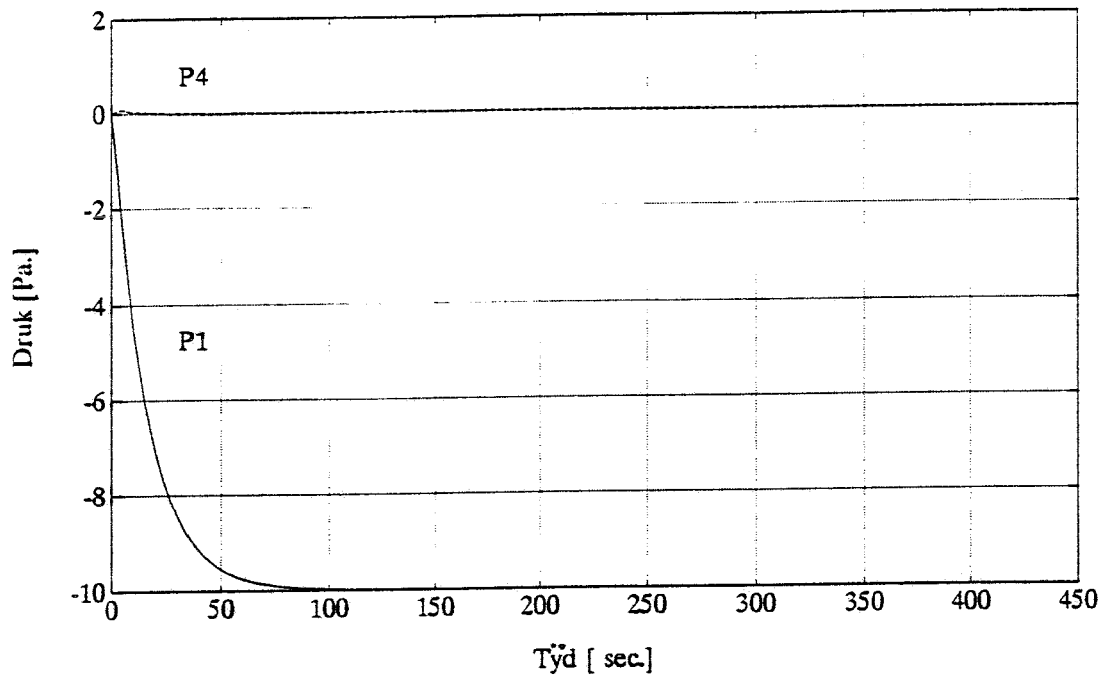


P3 t.o.v. de tijd (situatie 2)

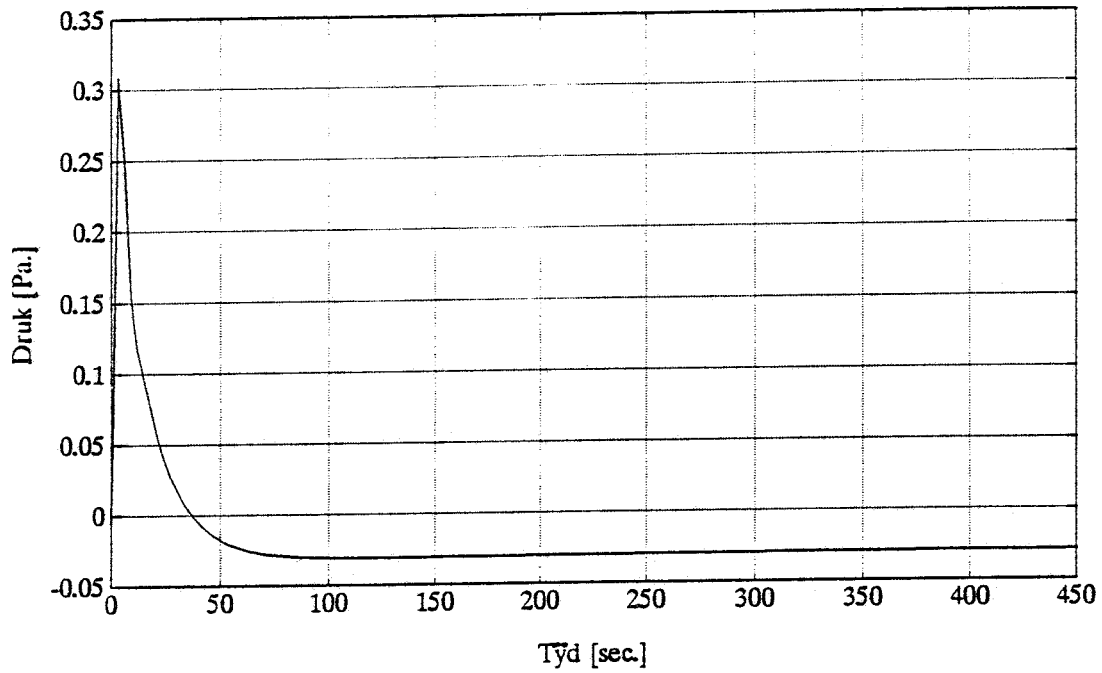


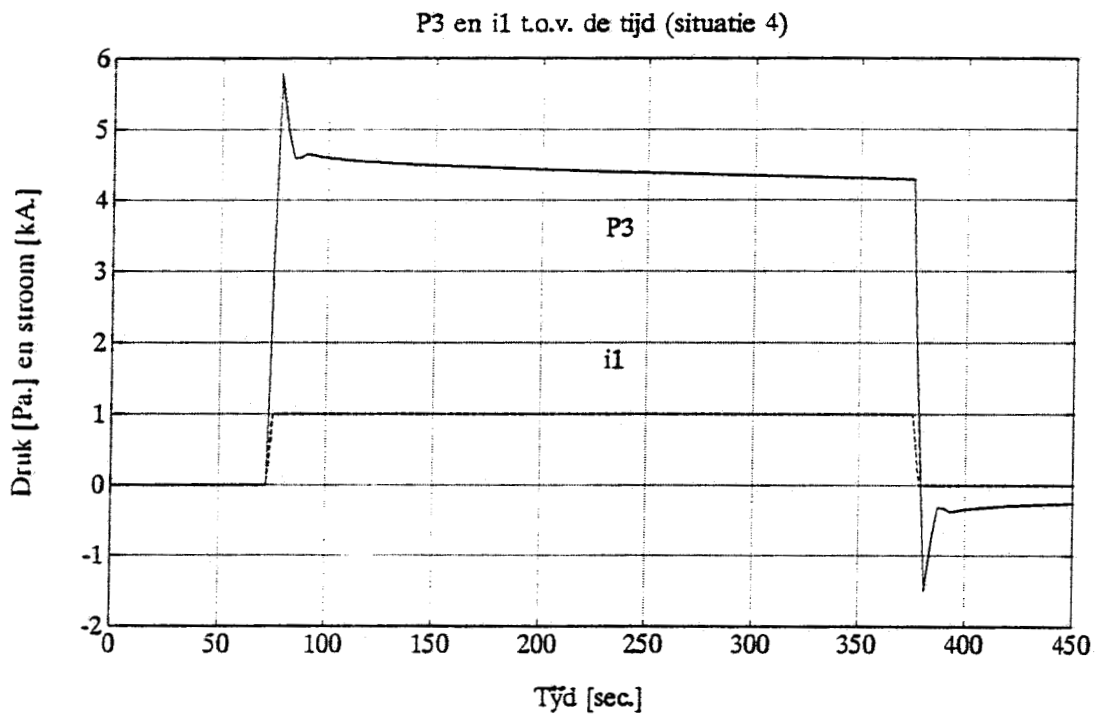
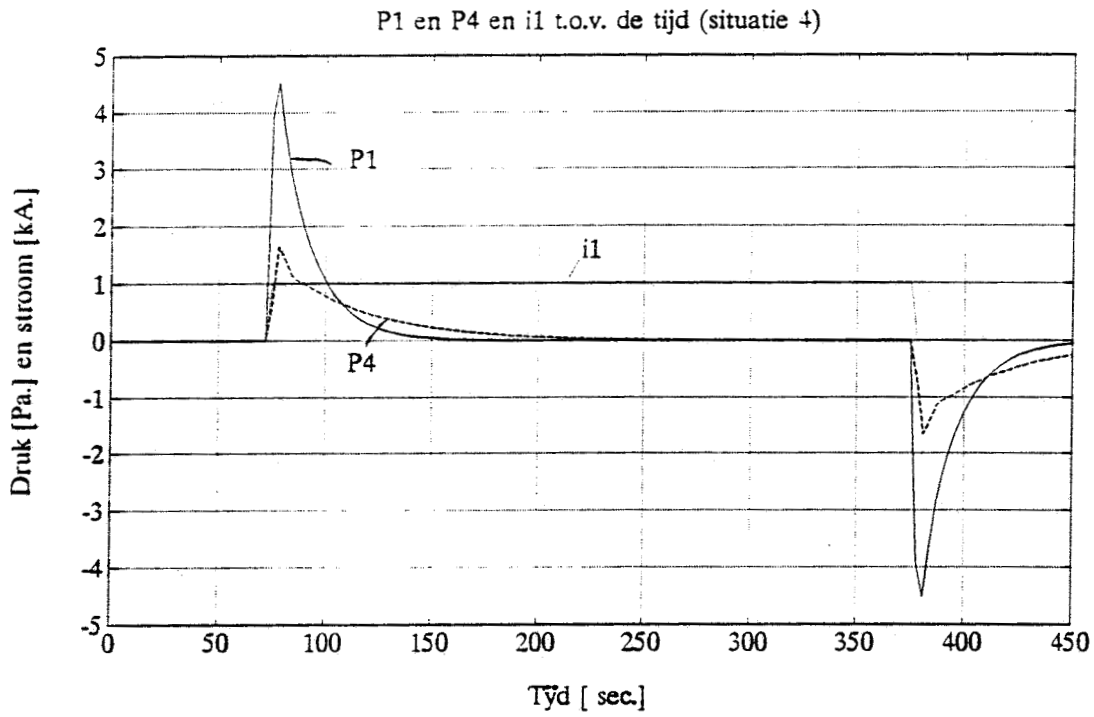


P1 en P4 t.o.v. de tijd (situatie 3)



P3 t.o.v. de tijd (situatie 3)





Bespreking van de resultaten

Het blijkt dat de simulatie-resultaten trendmatig met de werkelijkheid overéénkomen.

Met simulaties zonder regelingen (situatie 1) blijkt er zich een nieuw evenwicht in te stellen. Dit komt overéén met de werkelijkheid. Door het ontstaan van hogere drukken zullen de ventilatoren meer gas gaan aanzuigen, het gevolg is dat er na enige tijd weer een evenwicht zal ontstaan. Dit ontstaat wel bij een ander werkpunt.

Met simulaties met de regelingen (situatie 2 tm. situatie 4) blijkt het zo te zijn dat de regelingen de kleine verstoringen weggeregelen. Er ontstaat alleen een (kleine) stationaire afwijking in ΔP_3 (ΔP_3 is op den duur niet gelijk aan nul). Waarom hier een stationaire afwijking ontstaat is mij niet geheel duidelijk, dit moet nader onderzocht worden.

Er zijn ook simulaties uitgevoerd om de regelaars afzonderlijk te testen, de (goede) resultaten zijn niet in dit rapport opgenomen.

De programma's

Op de volgende bladzijden zijn de programma's waarmee de simulaties zijn uitgevoerd gegeven.

PROGRAMMA 1

Dit programma berekent A en B van de gelineariseerde toestandvergelijking. De toestandvergelijking is om het onderstaande stationaire werkpunt gelineariseerd. De toestanden zijn ondergebracht in de onderstaande toestandsvektor (zie ook bijlage 2.). Daar de toestandsvgl. gelineariseerd is bestaat deze vektor uit kleine variaties van de toestanden.

```
%
% dx= [ dP1, dRt1, dP2, dRt2, dP4, dP3, dP5, dP6, dP7a, dP7b,
% dP7c, dP7d, dRtt5, dP8, dRt4, dP9a, dRt5, dP9b, dP10a, dP10b,
% dP11]
```

```
% De ingangsgrootheden zijn ondergebracht in onderstaande
% ingangsvektor
```

```
% dU= [ di1, dPt1, dspP1, dspP4, di2, dPt2, dspP3, dspP9a,
% dspP9b]
```

```
% Het stationaire werkpunt
```

```
%
i1= 100; PT1= 1.385*10^5; P1= ((10^5)-200); spP1= ((10^5)-200);
P2= ((10^5)-300); P3= ((10^5)-3000); i2= 120; PT2= 1.385*10^5;
P4= ((10^5)-200); spP4= ((10^5)-200); P5= ((10^5)-3100);
P6= ((10^5)-3500); P7a= ((10^5)-4000); P7b= ((10^5)-6000);
P7c= ((10^5)-8000); P7d= ((10^5)-10000); P8= ((10^5)-12000);
P9a= ((10^5)+60000); P9b= ((10^5)+60000); P10a= ((10^5)+50000);
P10b= ((10^5)+50000); P11= ((10^5)+40000); spP9a= ((10^5)+60000);
spP9b= ((10^5)+60000); spP3= ((10^5)-3000);
```

```
% Het opstellen van de matrix A en matrix B.
```

```
% Nummer 1 A -P1-
```

```
%
Rg1= 200; T1= 353; V1= 64.8; a1= -0.000012; k11= 1.875/100;
R1= 42.46; Rw= 462; Rcl= 117;
```

```
%
A(1,1)= ((a1*Rw*T1)/V1)-((Rg1*T1)/(V1*R1));
A(1,2)= 0;
A(1,3)= (Rg1*T1)/(V1*R1);
A(1,4)= 0; A(1,5)= 0; A(1,6)= 0; A(1,7)= 0; A(1,8)= 0; A(1,9)=
0;
A(1,10)= 0; A(1,11)= 0; A(1,12)= 0; A(1,13)= 0; A(1,14)= 0;
A(1,15)= 0;
A(1,16)= 0; A(1,17)= 0; A(1,18)= 0; A(1,19)= 0; A(1,20)= 0;
A(1,21)= 0;
```

bijlage 3

```

%
% Nummer 1B
%
B(1,1)= (k11*Rc1*T1)/V1;
B(1,2)= -(a1*Rg1*T1)/V1;
B(1,3)= 0; B(1,4)= 0; B(1,5)= 0; B(1,6)= 0; B(1,7)= 0;
B(1,8)= 0; B(1,9)= 0; B(1,10)= 0;
%
% Nummer 2A -RT1-
%
k1= 4/3; tau1= 12;
%
A(2,1)= -k1*((a1*Rw*T1)/V1)-(Rg1*T1)/(V1*R1)-(k1/tau1);
A(2,2)= 0;
A(2,3)= -k1*(Rg1*T1)/(V1*R1);
A(2,4)= 0; A(2,5)= 0; A(2,6)= 0; A(2,7)= 0; A(2,8)= 0; A(2,9)=
0;
A(2,10)= 0; A(2,11)= 0; A(2,12)= 0; A(2,13)= 0; A(2,14)= 0;
A(2,15)= 0;
A(2,16)= 0; A(2,17)= 0; A(2,18)= 0; A(2,19)= 0; A(2,20)= 0;
A(2,21)= 0;
%
% Nummer 2B
%
B(2,1)= -k1*(k11*Rc1*T1)/V1;
B(2,2)= -k1*(-a1*Rg1*T1)/V1;
B(2,3)= k1/tau1; B(2,4)= 0; B(2,5)= 0; B(2,6)= 0; B(2,7)= 0;
B(2,8)= 0;
B(2,9)= 0; B(2,10)= 0;
%
% Nummer 3A -P2-
%
Rg2= 150; T2= 303; V2= 10; Rnr1= 1323.8;
%
A(3,1)= ((Rg2*T2)/(V2*R1))-0.5*a1*((Rw*T2)/V2);
A(3,2)= ((Rg2*T2/V2)*((+P2-P3)/(Rnr1)^2));
A(3,3)= -(Rg2*T2)/(V2*R1)-((Rg2*T2)/(V2*Rnr1));
A(3,4)= 0; A(3,5)= 0;
A(3,6)= (Rg2*T2)/(V2*Rnr1);
A(3,7)= 0;
A(3,8)= 0; A(3,9)= 0; A(3,10)= 0; A(3,11)= 0; A(3,12)= 0;
A(3,14)= 0;
A(3,15)= 0; A(3,16)= 0; A(3,17)= 0; A(3,18)= 0; A(3,19)= 0;
A(3,20)= 0;
A(3,21)= 0;
%

```

bijlage 3

```
% Nummer 3B
%
B(3,1)= 0;
B(3,2)= Rw*T2*0.5*a1/V2;
B(3,3)= 0; B(3,4)= 0; B(3,5)= 0; B(3,6)= 0; B(3,7)= 0;
B(3,8)= 0; B(3,9)= 0; B(3,10)= 0;

%
% Nummer 4A -RT2-
%
tau2= 30; k2= 2/3;
%
T4= 353; V4= 138.24; Rg4= 185; k22= 2.66/120; a2= -0.0000175;
Rnr2= 838.3;
%
H5= Rg4*T4/V4;
%
A(4,1)= 0; A(4,2)= 0; A(4,3)= 0;
A(4,4)= -k2*H5*((P4-P3)/(Rnr2)^2);
A(4,5)= -k2*((-H5/Rnr2)+(T4*Rw*a2/V4))+(-k2/tau2);
A(4,6)= -k2*H5/Rnr2;
A(4,7)= 0; A(4,8)= 0; A(4,9)= 0; A(4,10)= 0; A(4,11)= 0; A(4,12)=
0;
A(4,13)= 0; A(4,14)= 0; A(4,15)= 0; A(4,16)= 0; A(4,17)= 0;
A(4,18)= 0;
A(4,19)= 0; A(4,20)= 0; A(4,21)= 0;
%
% Nummer 4B
%
B(4,1)= 0; B(4,2)= 0; B(4,3)= 0;
B(4,4)= k2/tau2;
B(4,5)= -k2*(Rcl*T4*k22/V4);
B(4,6)= -k2*(-a2*Rw*T4/V4);
B(4,7)= 0; B(4,8)= 0; B(4,9)= 0; B(4,10)= 0;
%
%
% Nummer 5A -P4-
%
T4= 353; V4= 138.24; Rg4= 185; k22= 2.66/120; a2= -0.0000175;
Rnr2= 838.3;
%
A(5,1)= 0; A(5,2)= 0; A(5,3)= 0;
A(5,4)= H5*((P4-P3)/(Rnr2)^2);
A(5,5)= (-H5/Rnr2)+(T4*Rw*a2/V4);
A(5,6)= H5/Rnr2;
A(5,7)= 0; A(5,8)= 0; A(5,9)= 0; A(5,10)= 0; A(5,11)= 0; A(5,12)=
0;
A(5,13)= 0; A(5,14)= 0; A(5,15)= 0; A(5,16)= 0; A(5,17)= 0;
A(5,18)= 0;
A(5,19)= 0; A(5,20)= 0; A(5,21)= 0;
```

bijlage 3

```

%
% Nummer 5B
%
B(5,1)= 0; B(5,2)= 0; B(5,3)= 0;
B(5,4)= 0;
B(5,5)= Rcl*T4*k22/V4;
B(5,6)= -a2*Rw*T4/V4;
B(5,7)= 0; B(5,8)= 0; B(5,9)= 0; B(5,10)= 0;
%
% Nummer 6A -P3-
%
Rg3= 170; V3= 17.16; T3= 328; R5=18;
%
H6= Rg3*T3/V3;
A(6,1)= -Rw*T3*0.25*a1/V3;
A(6,2)= H6*((-P2+P3)/(Rnr1)^2);
A(6,3)= H6/Rnr1;
A(6,4)= H6*((-P4+P3)/(Rnr2)^2);
A(6,5)= (H6/Rnr2)-Rw*T3*0.5*a2/V3;
A(6,6)= H6*((-1/Rnr1)+(-1/Rnr2)+(-1/R5));
A(6,7)= H6/R5;
A(6,8)= 0; A(6,9)= 0; A(6,10)= 0; A(6,11)= 0; A(6,12)= 0;
A(6,13)= 0;
A(6,14)= 0; A(6,15)= 0; A(6,16)= 0; A(6,17)= 0; A(6,18)= 0;
A(6,19)= 0;
A(6,20)= 0; A(6,21)= 0;
%
% Nummer 6B
%
B(6,:)= [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0];
%
% Nummer 7A -P5-
%
V5= 26.67; T5= 293; R6= 88; Rg5=170;
%
H7= Rg5*T5/V5;
A(7,1)= -Rw*T5*0.25*a1/V5;
A(7,2)= 0;
A(7,3)= 0;
A(7,4)= 0;
A(7,5)= -Rw*T5*0.5*a2/V5;
A(7,6)= H7/R5;
A(7,7)= (-H7/R5)+(-H7/R6);
A(7,8)= H7/R6;
A(7,9)= 0; A(7,10)= 0; A(7,11)= 0; A(7,12)= 0; A(7,13)= 0;
A(7,14)= 0;
A(7,15)= 0; A(7,16)= 0; A(7,17)= 0; A(7,18)= 0; A(7,19)= 0;
A(7,20)= 0;
A(7,21)= 0;

```

bijlage 3

```
%
% Nummer 7B
%
B(7,1)= 0;
B(7,2)= 0.5*Rw*T5*a1/V5;
B(7,3)= 0;
B(7,4)= 0; B(7,5)= 0;
B(7,6)= Rw*T5*a2/V5;
B(7,7)= 0; B(7,8)= 0; B(7,9)= 0;
B(7,10)= 0;
%
% Nummer 8A -P6-
%
T6= 293; V6= 44.22; R7a= 110;
%
H8=Rcl*T6/V6;
A(8,1)= 0; A(8,2)= 0; A(8,3)= 0; A(8,4)= 0; A(8,5)= 0;
A(8,6)= 0;
A(8,7)= (H8/R6);
A(8,8)= (-H8/R6)+(-H8/R7a);
A(8,9)= (H8/R7a);
A(8,10)= 0; A(8,11)= 0; A(8,12)= 0; A(8,13)= 0; A(8,14)= 0;
A(8,15)= 0;
A(8,16)= 0; A(8,17)= 0; A(8,18)= 0; A(8,19)= 0; A(8,20)= 0;
A(8,21)= 0;
%
% Nummer 8B
%
B(8,:)= [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0];
%
% Nummer 9A -P7a-
%
V7a= 22.75; T7a= 293; R7b= 440;
%
H9=Rcl*T7a/V7a;
A(9,1)= 0; A(9,2)= 0; A(9,3)= 0; A(9,4)= 0; A(9,5)= 0; A(9,6)=
0; A(9,7)= 0;
A(9,8)= H9/R7a;
A(9,9)= (-H9/R7a)+(-H9/R7b);
A(9,10)= H9/R7b;
A(9,11)= 0; A(9,12)= 0; A(9,13)= 0; A(9,14)= 0; A(9,15)= 0;
A(9,16)= 0;
A(9,17)= 0; A(9,18)= 0; A(9,19)= 0; A(9,20)= 0; A(9,21)= 0;
%
% Nummer 9B
%
B(9,:)= [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0];
%
```

bijlage 3

```
% Nummer 10A -P7b-
%
V7b= 22.75; T7b= 293; R7c= 440;
%
H10= Rcl*T7b/V7b;
A(10,1)= 0; A(10,2)= 0; A(10,3)= 0; A(10,4)= 0; A(10,5)= 0;
A(10,6)= 0;
A(10,7)= 0; A(10,8)= 0;
A(10,9)= H10/R7b;
A(10,10)= (-H10/R7b)+(-H10/R7c);
A(10,11)= (H10/R7c);
A(10,12)= 0; A(10,13)= 0; A(10,14)= 0; A(10,15)= 0; A(10,16)= 0;
A(10,17)=0;
A(10,18)= 0; A(10,19)= 0; A(10,20)= 0; A(10,21)= 0;
%
% Nummer 10B
%
B(10,:)= [ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0];
%
% Nummer 11A -P7c-
%
V7c= 22.75; T7c= 293; R7d= 440;
%
H11=Rcl*T7c/V7c;
A(11,1)= 0; A(11,2)= 0; A(11,3)= 0; A(11,4)= 0; A(11,5)= 0;
A(11,6)= 0;
A(11,7)= 0; A(11,8)= 0; A(11,9)= 0;
A(11,10)= H11/R7c;
A(11,11)= (-H11/R7c)+(-H11/R7d);
A(11,12)= H11/R7d;
A(11,13)= 0; A(11,14)= 0; A(11,15)= 0; A(11,16)= 0; A(11,17)= 0;
A(11,18)= 0;
A(11,19)= 0; A(11,20)= 0; A(11,21)= 0;
%
% Nummer 11B
%
B(11,:)= [ 0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0];
%
% Nummer 12A -P7d-
%
R8= 440; T7d= 293; V7d= 22.75;
%
A(12,1)= 0; A(12,2)= 0; A(12,3)= 0; A(12,4)= 0; A(12,5)= 0;
A(12,6)= 0;
A(12,7)= 0; A(12,8)= 0; A(12,9)= 0; A(12,10)= 0;
H12= Rcl*T7d/V7d;
A(12,11)= H12/R7d;
A(12,12)= (-H12/R7d)+(-H12/R8);
```

```

A(12,13)= 0;
A(12,14)= H12/R8;
A(12,15)= 0; A(12,16)= 0; A(12,17)= 0; A(12,18)= 0;
A(12,19)= 0; A(12,20)= 0; A(12,21)= 0;
%
% Nummer 12B
%
B(12,:)= [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0];
%
% Nummer 13A -Rtt5-
%
tau6= 36; taud6= 0.9; k6= -2/3;
%
H6= Rg3*T3/V3;
H13a= (-k6*taud6)*H6*((-P2+P3)/(Rnr1)^2);
H13b= (-k6*taud6)*H6/Rnr1;
H13c= (-k6*taud6)*((-P4+P3)/(Rnr2)^2);
H13d= (-k6*taud6)*(H6/Rnr2);
H13e= (-k6*taud6)*((-1/Rnr1)+(-1/Rnr2)+(-1/R5));
H13f= (-k6*taud6)*(H6/R5);
A(13,1)= -k6*(-Rw*T3*0.25*a1/V3)+H13e*(-Rw*T3*0.25*a1/V3) ..
+H13a*((-k1*((a1*Rw*T1)/V1)-(Rg1*T1)/(V1*R1)))+(-k1/taul)) ..
+(H13b*((Rg2*T2)/(V2*R1))-0.5*a1*((Rw*T2)/V2)) ..
+(H13f*(-Rw*T5*0.25*a1/V5));
A(13,2)= (-k6*H6*((-P2+P3)/(Rnr1)^2))+
(H13b*((Rg2*T2)/V2)*((P2-P3)/(Rnr1)^2)) ..
+(H13e*(H6*((-P2+P3)/(Rnr1)^2)));
A(13,3)= (-k6*H6/Rnr1)+(H13a*(-k1*(Rg1*T1)/(V1*R1))) ..
+(H13b*((-Rg2*T2)/(V2*R1))-((Rg2*T2)/(V2*Rnr1)))) ..
+(H13e*(H6/Rnr1));
A(13,4)= (-k6*H6*((-P4+P3)/(Rnr2)^2)) ..
+(H13c*(-k2*H5*((P4-P3)/(Rnr2)^2))) ..
+(H13d*(H5*((P4-P3)/(Rnr2)^2)))+(H13e*(H6*((-P4+P3)/(Rnr2)^2)));
A(13,5)= (-k6*((H6/Rnr2)-(Rw*T3*0.5*a2/V3)))+ ..
(H13e*(-Rw*T3*0.5*a2/V3)) ..
+(H13c*((-k2*((-H5/Rnr2)+(T4*Rw*a2)/V4))+(-k2/tau2))) ..
+(H13d*((-H5/Rnr2)+(T4*Rw*a2/V4)))+(H13e*(H6/Rnr2)) ..
+(H13f*(-Rw*T5*0.5*a2/V5));
A(13,6)= (-k6*H6*((-1/Rnr1)+(-1/Rnr2)+(-1/R5)))+(-k6/tau6) ..
+(H13b*((Rg2*T2)/(V2*Rnr1)))+(H13c*(-k2*H5/Rnr2))+..
(H13d*(H5/Rnr2)))+(H13e*(H6*((-1/Rnr1)+(-1/Rnr2)+(-1/R5))))+..
(H13f*(H7/R5));
A(13,7)= (-k6*H6/R5)+(H13e*(H6/R5))+(H13f*((-H7/R5)+(-H7/R6)));
A(13,8)= H13f*(H7/R6);
A(13,9)= 0; A(13,10)= 0; A(13,11)= 0; A(13,12)= 0; A(13,13)= 0;
A(13,14)= 0;
A(13,15)= 0; A(13,16)= 0; A(13,17)= 0; A(13,18)= 0; A(13,19)= 0;
A(13,20)= 0;
A(13,21)= 0;
%

```


bijlage 3

```

% Nummer 13B
%
B(13,1)= (H13a*(-k1*(k11*Rcl*T1)/V1));
B(13,2)= (H13a*(-k1*(-a1*Rg1*T1)/V1))+..
(H13b*(Rw*T2*0.5*a1/V2))+(H13f*(0.5*Rw*T5*a1/V5));
B(13,3)= (H13a*(k1/tau1));
B(13,4)= (H13c*(k2/tau2));
B(13,5)= (H13c*(-k2*(Rcl*T4*k22/V4)))+(H13d*(Rcl*T4*k22/V4));
B(13,6)= (H13c*(-k2*(-a2*Rw*T4/V4)))+(H13d*(-a2*Rw*T4/V4)) ..
+(H13f*(Rw*T5*a2/V5));
B(13,7)= k6/tau6 ;
B(13,8)= 0; B(13,9)= 0; B(13,10)= 0;
%
% Nummer 14A -P8-
%
V8= 9.21; T8= 293; av= -0.00003; Rtt6= 44828 ;
%
H14= Rcl*T8/V8;
A(14,1)= 0; A(14,2)= 0; A(14,3)= 0; A(14,4)= 0; A(14,5)= 0;
A(14,6)= 0;
A(14,7)= 0; A(14,8)= 0; A(14,9)= 0; A(14,10)= 0; A(14,11)= 0;
A(14,12)= H14/R8;
A(14,13)= H14*((-P11+P8)/(Rtt6)^2);
A(14,14)= (-H14/R8)+(-H14/Rtt6)+(2*H14*av);
A(14,15)= 0;
A(14,16)= -H14*av;
A(14,17)= 0;
A(14,18)= -H14*av;
A(14,19)= 0; A(14,20)= 0;
A(14,21)= H14/Rtt6;
%
% Nummer 14B
%
B(14,:)= [ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0];
%
% Nummer 15A -RT3-
%
tau4= 60; k4= 4/7;
%
%
T9a= 363; V9a= 1.73; Rnr4= 3509;
%
H16= Rcl*T9a/V9a;
A(15,1)= 0; A(15,2)= 0; A(15,3)= 0; A(15,4)= 0; A(15,5)= 0;
A(15,6)= 0;
A(15,7)= 0; A(15,8)= 0; A(15,9)= 0; A(15,10)= 0; A(15,11)= 0;
A(15,12)= 0;
A(15,13)= 0;

```

bijlage 3

```
A(15,14)= -k4*(-H16*av);
A(15,15)= -k4*(H16*((P9a-P10a)/(Rnr4)^2));
A(15,16)= -k4*((-H16/Rnr4)+(H16*av))+(-k4/tau4);
A(15,17)= 0; A(15,18)= 0;
A(15,19)= -k4*H16/Rnr4;
A(15,20)= 0; A(15,21)= 0;
%
% Nummer 15B
%
B(15,1)= 0; B(15,2)= 0; B(15,3)= 0; B(15,4)= 0; B(15,5)= 0;
B(15,6)= 0;
B(15,7)= 0;
B(15,8)= k4/tau4;
B(15,9)= 0; B(15,10)= 0;
%
% Nummer 16A -P9a-
%
T9a= 363; V9a= 1.73; Rnr4= 3509;
%
H16= Rcl*T9a/V9a;
A(16,1)= 0; A(16,2)= 0; A(16,3)= 0; A(16,4)= 0; A(16,5)= 0;
A(16,6)= 0;
A(16,7)= 0; A(16,8)= 0; A(16,9)= 0; A(16,10)= 0; A(16,11)= 0;
A(16,12)= 0;
A(16,13)= 0;
A(16,14)= -H16*av;
A(16,15)= H16*((P9a-P10a)/(Rnr4)^2);
A(16,16)= (-H16/Rnr4)+(H16*av);
A(16,17)= 0; A(16,18)= 0;
A(16,19)= H16/Rnr4;
A(16,20)= 0; A(16,21)= 0;
%
% Nummer 16B
%
B(16,:)= [ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 ];
%
% Nummer 17A -Rt4-
%
tau5= 42; k5= 1;
%
%
T9b= 363; V9b= 1.73; Rnr5= 3509;
%
H18= Rcl*T9b/V9b;
A(17,1)= 0; A(17,2)= 0; A(17,3)= 0; A(17,4)= 0; A(17,5)= 0;
A(17,6)= 0;
A(17,7)= 0; A(17,8)= 0; A(17,9)= 0; A(17,10)= 0; A(17,11)= 0;
A(17,12)= 0; A(17,13)= 0;
```

bijlage 3

```
A(17,14)= -k5*(-H18*av);
A(17,15)= 0; A(17,16)= 0;
A(17,17)= -k5*(H18*((P9b-P10b)/(Rnr5)^2));
A(17,18)= -k5*((-H18/Rnr5)+(H18*av))+(-k5/tau5);
A(17,19)= 0;
A(17,20)= -k5*(H18/Rnr5);
A(17,21)= 0;
%
% Nummer 17B
%
B(17,1)= 0; B(17,2)= 0; B(17,3)= 0; B(17,4)= 0; B(17,5)= 0;
B(17,6)= 0;
B(17,7)= 0; B(17,8)= 0;
B(17,9)= k5/tau5;
B(17,10)= 0;
%
% Nummer 18A -P9b-
%
T9b= 363; V9b= 1.73; Rnr5= 3509;
%
H18= Rcl*T9b/V9b;
A(18,1)= 0; A(18,2)= 0; A(18,3)= 0; A(18,4)= 0; A(18,5)= 0;
A(18,6)= 0;
A(18,7)= 0; A(18,8)= 0; A(18,9)= 0; A(18,10)= 0; A(18,11)= 0;
A(18,12)= 0; A(18,13)= 0;
A(18,14)= -H18*av;
A(18,15)= 0; A(18,16)= 0;
A(18,17)= H18*((P9b-P10b)/(Rnr5)^2);
A(18,18)= (-H18/Rnr5)+(H18*av);
A(18,19)= 0;
A(18,20)= H18/Rnr5;
A(18,21)= 0;
%
% Nummer 18B
%
B(18,:)= [ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 ];
%
% Nummer 19A -P10a-
%
T10a= 322; V10a= 7.46; R11a= 3509;
%
H19= Rcl*T10a/V10a;
A(19,1)= 0; A(19,2)= 0; A(19,3)= 0; A(19,4)= 0; A(19,5)= 0;
A(19,6)= 0;
A(19,7)= 0; A(19,7)= 0; A(19,8)= 0; A(19,9)= 0; A(19,10)= 0;
A(19,11)= 0;
A(19,12)= 0; A(19,13)= 0; A(19,14)= 0;
A(19,15)= H19*((-P9a+P10a)/(Rnr4)^2);
A(19,16)= (H19/Rnr4);
```

bijlage 3

```

A(19,17)= 0; A(19,18)= 0;
A(19,19)= (-H19/Rnr4)+(-H19/R11a);
A(19,20)= 0;
A(19,21)= H19/R11a;
%
% Nummer 19B
%
%
B(19,:)= [ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 ];
%
% Nummer 20A -P10b-
%
V10b= 7.46; T10b= 322; R11b= 3509;
%
A(20,1)= 0; A(20,2)= 0; A(20,3)= 0; A(20,4)= 0; A(20,5)= 0;
A(20,6)= 0;
A(20,7)= 0; A(20,8)= 0; A(20,9)= 0; A(20,10)= 0; A(20,11)= 0;
A(20,11)= 0;
A(20,12)= 0; A(20,13)= 0; A(20,14)= 0; A(20,15)= 0; A(20,16)= 0;
H20= Rcl*T10b/V10b;
A(20,17)= H20*((-P9b+P10b)/(Rnr5)^2);
A(20,18)= (H20/Rnr5);
A(20,19)= 0;
A(20,20)= (-H20/Rnr5)+(-H20/R11b);
A(20,21)= H20/R11b;
%
% Nummer 20B
%
B(20,:)= [ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 ];
%
% Nummer 21A -P11-
%
T11= 293; V11= 12.13; avs= -0.00052;
%
H21= Rcl*T11/V11;
A(21,1)= 0; A(21,2)= 0; A(21,3)= 0; A(21,4)= 0; A(21,5)= 0;
A(21,6)= 0;
A(21,7)= 0; A(21,8)= 0; A(21,9)= 0; A(21,10)= 0; A(21,11)= 0;
A(21,12)= 0;
A(21,13)= H21*((P11-P8)/(Rttn6)^2);
A(21,14)= H21/Rttn6;
A(21,15)= 0; A(21,16)= 0; A(21,17)= 0; A(21,18)= 0;
A(21,19)= (H21/R11a);
A(21,20)= (H21/R11b);
A(21,21)= (-H21/R11a)+(-H21/R11b)+(H21*avs)+(-H21/Rttn6);
%

```

bijlage 3

% Nummer 21B

%

B(21,1)= 0; B(21,2)= 0; B(21,3)= 0; B(21,4)= 0;

B(21,5)= 0; B(21,6)= 0; B(21,7)= 0;

B(21,8)= 0; B(21,9)= 0;

B(21,10)= -H21*avs;

%

PROGRAMMA 2

Dit programma werkt met programma 1 en berekent met lsim het verloop van de toestand en de gekozen uitgangen bij opgelegde verstoring.

```

%
pack;
t= [0: 3: 450]';
%
% De ingangssignalen (van situatie 4).
%
di1= [ zeros(1,25), ones(1,length(t)-50), zeros(1,25) ];
dPt1= zeros(1,length(t));
dspP1= zeros(1,length(t));
dspP4= zeros(1,length(t));
di2= zeros(1,length(t));
dPt2= zeros(1,length(t));
dspP3= zeros(1,length(t));
dspP9a= zeros(1,length(t));
dspP9b= zeros(1,length(t));
dPin= zeros(1,length(t));
%
% De ingang U
%
U=[ di1
    dPt1
    dspP1
    dspP4
    di2
    dPt2
    dspP3
    dspP9a
    dspP9b
    dPin];
%
% De uitgangsgrootheden worden met behulp van de matrix C
% gemaakt.
% Y= CX+DU
% Voorlopig wil ik de geregelde grootheden als de uitygang
% beschouwen.
% De geregelde grootheden zijn: P1=X(1,1), P4=X(4,1), P3= X(6,1),
% P9a= X(16,1), P9b= X(18,1)
%
%   P1
%
C(1,1)= 1; C(1,2)= 0; C(1,3)= 0; C(1,4)= 0; C(1,5)= 0; C(1,6)=
0; C(1,7)= 0;

```

bijlage 3

```
C(1,8)= 0; C(1,9)= 0; C(1,10)= 0; C(1,11)= 0; C(1,12)= 0;
C(1,13)= 0;
C(1,14)= 0; C(1,15)= 0; C(1,16)= 0; C(1,17)= 0; C(1,18)= 0;
C(1,19)= 0;
C(1,20)= 0; C(1,21)= 0;
%
% P4
%
C(2,1)= 0; C(2,2)= 0; C(2,3)= 0; C(2,4)= 0; C(2,5)= 1; C(2,6)=
0;
C(2,7)= 0; C(2,8)= 0; C(2,9)= 0; C(2,10)= 0; C(2,11)= 0; C(2,12)=
0;
C(2,13)= 0; C(2,14)= 0; C(2,15)= 0; C(2,16)= 0; C(2,17)= 0;
C(2,18)= 0;
C(2,19)= 0; C(2,20)= 0; C(2,21)= 0;
%
% P3
%
C(3,1)= 0; C(3,2)= 0; C(3,3)= 0; C(3,4)= 0; C(3,5)= 0; C(3,6)=
1; C(3,7)= 0;
C(3,8)= 0; C(3,9)= 0; C(3,10)= 0; C(3,11)= 0; C(3,12)= 0;
C(3,13)= 0;
C(3,14)= 0; C(3,15)= 0; C(3,16)= 0; C(3,17)= 0; C(3,18)= 0;
C(3,19)= 0;
C(3,20)= 0; C(3,21)= 0;
%
% P9a
%
C(4,1)= 0; C(4,2)= 0; C(4,3)= 0; C(4,4)= 0; C(4,5)= 0; C(4,6)=
0; C(4,7)= 0;
C(4,8)= 0; C(4,9)= 0; C(4,10)= 0; C(4,11)= 0; C(4,12)= 0;
C(4,13)= 0;
C(4,14)= 0; C(4,15)= 0; C(4,16)= 1; C(4,17)= 0; C(4,18)= 0;
C(4,19)= 0;
C(4,20)= 0; C(4,21)= 0;
%
% P9b
%
C(5,1)= 0; C(5,2)= 0; C(5,3)= 0; C(5,4)= 0; C(5,5)= 0; C(5,6)=
0; C(5,7)= 0;
C(5,8)= 0; C(5,9)= 0; C(5,10)= 0; C(5,11)= 0; C(5,12)= 0;
C(5,13)= 0;
C(5,14)= 0; C(5,15)= 0; C(5,16)= 0; C(5,17)= 0; C(5,18)= 1;
C(5,19)= 0;
C(5,20)= 0; C(5,21)= 0;
%
% De matrix D
%
D= zeros(5,10);
%
```

bijlage 3

```
% De berekening van de uitgang Y en de toestand X met lsim
%
[Y,X]=lsim(A,B,C,D,U,t);
%
% Het uitplotten van enige resultaten
%
plot(t,Y(:,3)), title(' P3'), grid; pause
plot(t,Y(:,5)), title(' P9b'), grid ;pause
%
```


symbolenlijst en uitvouwblad

Symbolenlijst en Uitvouwblad

stagerapport TUE, solvay

symbolenlijst

SYMBOLENLIJST

P_i	druk	[Pa]
T_i	temperatuur	[K]
V_i	volume	[m ³]
R_{g_i}	gaskonstante mengsel	[J/kg.K]
R_{c_l}	gaskonstante chloor	[J/kg.K]
R_w	gaskonstante water	[J/kg.K]
k	regelversterkingsfactor	[-]
τ_i	tijdsconstante	[s]
α_v	faktor Vent R	[kg/Pa.s]
α_{vs}	faktor Vent S	[kg/Pa.s]
k_{i_i}	faktor elek. stroom	[kg/kA.s]
R_i	weerstand in leiding	[Pa.s/kg]
R_{nr_i}	weerstand regelklep	[Pa.s/kg]
m_i	massa	[kg]
M_i	molaire massa	[kg/kmol]
R_{t_i}	regelsignaal	[-]
ϕ_i	massastroom	[kg/s]
α_i	faktor dampspanning	[kg/Pa.s]
i_i	elektrische stroom	[kA]
P_{t_i}	dampspanning	[Pa]
spP_i	regelaar-instelling	[Pa]
t	tijd	[s]

