

# REGELTECHNISCH ONDERZOEK IN KASSEN

Deel 1: Het gebruik van twee warmtebronnen  
bij toepassing van twee buisverwarmingssystemen

Ing. P.W.T. Verwaaijen

Mede financiering door het Projectbeheerbureau Energie Onderzoek  
IMAG Projectleider: Ing. W.Th.M.van Meurs

Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen,  
Postbus 43, 6700 AA Wageningen  
tel. 08370-94911



## SAMENVATTING.

De doelstelling van het onderzoek was het ontwerp van een regelalgorithme, dat in de praktijk kan worden gebruikt voor het verwarmen van kassen bij het gebruik van twee warmtebronnen. Voorwaarde hierbij is dat de warmtebronnen worden aangesloten op twee gescheiden verwarmingssystemen. De alternatieve warmtebron wordt door middel van een voorregeling gesimuleerd vanuit de ketelwarmtebron. Het regelalgorithme moet, buiten de regeltechnische eisen van een klimaatregeling, functioneren volgens de eisen voor het gebruik van alternatieve warmte. Binnen dit regeltechnisch onderzoek zijn de volgende voorwaarden gesteld ten aanzien van het gebruik van alternatieve warmte:

- Aanvoertemperatuur van het verwarmingssysteem bedraagt maximaal 68 oC.
  - Retourwatertemperatuur van het teruggeleverde water bedraagt maximaal 40 oC.
  - De warmtelevering van het verwarmingssysteem aangesloten op de alternatieve warmtebron is 30 % van de ontwerpbelasting = 54 W/m<sup>2</sup>.
- Voor het regelalgorithme gelden ten aanzien van het gebruik van alternatieve warmte in combinatie met ketelwarmte de volgende eisen:
- De regeling moet voldoen aan teeltkundige en regeltechnische eisen.
  - De alternatieve warmtebron dient optimaal te worden gebruikt. Dit betekent dat pas ketelwarmte geleverd mag worden indien het alternatieve warmtenet volledig open staat, tenzij de maximale retourwatertemperatuur in het geding komt.
  - Wanneer een overschrijding van de maximale retourwatertemperatuur dreigt plaats te vinden, zal het regelalgorithme dit moeten voorkomen. Er dient in dit geval dan nog steeds zoveel mogelijk alternatieve warmte geleverd te worden.

Aan de hand van de gevolgde strategie zal het regeltechnische onderzoek kort worden samengevat.

- Ontwerp van een simulatiemodel voor het regelproces in de kas. Vanwege de complexiteit van de regeling (regeltechnische eisen, gebruik alternatieve warmte, regeling van een instelbare maximale retourtemperatuur van het AW-net) is bij het ontwerp van een regelalgorithme gebruik gemaakt van een simulatiemodel van het regelproces. Dit regeltechnische model, dat bestaat uit differentiaalvergelijkingen, is omgevormd naar een model in de simulatietaal PSI.
- Systeemmetingen ter bepaling van de procesparameters. Ten behoeve van de parametrisering van het model is het noodzakelijk eerst waterzijdig alle debieten te meten en zonodig bij te stellen aan de hand van de geldende ontwerpcondities. Hierna dienen systeemmetingen in verschillende belastingssituaties (energieschermen geopend en gesloten) aan het praktische regelproces te worden verricht.
- Evaluatie en optimalisering van het simulatiemodel. Aan de hand van de verrichte systeemmetingen vindt verificatie van het model plaats. Alvorens de meetdata naar een juiste structuur te transformeren (PSI-formaat), zijn deze binnen het simulatiemodel ter beschikking gekomen. Het simulatiemodel wordt nu met het gemeten buitenklimaat van de verschillende meetdagen belast. Hierdoor is een vergelijking te maken met de door het model gegenereerde waarden en de in de praktijk gemeten waarden. Het model blijkt voor het regeltechnisch gedrag een uitstekende weergave van het werkelijk optredende gedrag te zijn, en dus zeer geschikt als hulpmiddel voor de ontwikkeling van het vereiste regelalgorithme.

- Ontwerp van een regelalgoritme op modelnivo.  
Met hulp van de simulatietaal PSI is een regelalgoritme ontworpen en uitgetest. Het "modified" type voor de Master-PI regelaar verdient de voorkeur ten opzichte van het "conventionele" type. In het niet-lineaire gebied van de regeling (regelkleppen volledig open of dicht) zal bij toepassing van het "modified" type de regeling sneller uit de verzadiging treden. Dit leidt tot geringere overshoot van de geregelde luchttemperatuur in de kas TKASL, maar vooral een lagere undershoot (TKASL lager dan het SETPOINT). Bij afkoeling is namelijk de gradient in TKASL groter dan bij het opstoken, zodat juist hier het sneller uit de verzadiging treden van de regeling een groot effect heeft. Het opnieuw initialiseren van de beide Master-regelaars, nodig bij het schakelen van verwarmingssystemen, is bij het gebruik van het "modified" type veel eenvoudiger dan bij het "conventionele" type.
- Testen/optimalisering van het regelalgoritme op modelnivo.  
Dit testen heeft plaatsgevonden op zoveel mogelijk belastingssituaties en storingsinvloeden die in een praktische regeling op kunnen treden. Doordat het simulatiemodel goed overeen komt met het werkelijke proces, kan de regeling volledig op simulatienivo worden uitgetest en ingesteld. Het ontworpen regelalgoritme is met aanpassing van de parameters universeel toepasbaar voor statisch en dynamisch uiteenlopende pijp-verwarmingssystemen aangesloten op twee verschillende warmtebronnen. De maximale retourtemperatuur van het AW-net kan op een willekeurig in te stellen waarde worden geregeld. Op deze wijze kan in de praktijk tegemoet worden gekomen aan verschillende randvoorwaarden bij toepassing van alternatieve warmtebronnen (warmtepomp, rest- en afvalwarmte, warmte/kracht etc.).
- Praktijk-evaluatie van het ontworpen regelalgoritme.  
Gedurende een groot aantal maanden heeft de regeling binnen het decentrale kasklimaatregelsysteem gefunctioneerd. Hierbij zijn een aantal meetnachten geselecteerd waarbij onder verschillende belastingssituaties (o.a. energieschermen geopend/gesloten) het klimaat in de kas is geregeld. Indien nu bij een geregelde situatie het model weer wordt belast met het werkelijk gemeten buitenklimaat, blijken ook hier de door het model gegenereerde waarden uitstekend overeen te komen met de praktische waarden. Het regelgedrag van de regeling komt niet in het geding indien de maximale retourtemperatuur van het AW-net kunstmatig wordt verlaagd. Het KW-net neemt soepel de vermindering van de bijdrage van het AW-net over. Dit geeft het regelprogramma een breed toepassingsgebied ten aanzien van de verscheidenheid aan eisen met betrekking tot verschillende vormen van alternatieve warmte. Het gebruik hiervan in de praktijk zou leiden tot een verhoogde bijdrage van alternatieve warmte en dus een vermindering van de aanwezige ketelwarmte.

## INHOUD

SAMENVATTING	2
-----	
1. Inleiding	5
-----	
2. Beschrijving onderzoekfaciliteiten	6
-----	
3. Beschrijving regeltechnisch onderzoek	8
-----	
3.1 Randvoorwaarden binnen het onderzoek	8
3.2 Regeltechnische eisen verwarmingsregeling	8
3.3 Gewaskeuze	9
3.4 Werkwijze onderzoek	9
4. Ontwerp van een simulatiemodel voor het regelproces	11
-----	
4.1 Begrenzungen (randvoorwaarden) model	11
4.2 Model voor de beschrijving van het regelproces	11
4.2.1 Model voor de overdrachtsfunctie van de mengklep	13
4.2.2 Model voor de beschrijving van de aanvoertemperatuur	14
4.2.3 Model voor de beschrijving van de kasluchttemperatuur	15
4.2.4 Model voor de beschrijving van de bodemtemperatuur	20
4.3 Model voor de beschrijving van het buitenklimaat	22
4.4 Het simulatiemodel in PSI	23
5. Validatie model aan de hand van systeemgedrag proces	24
-----	
5.1 Systeemmetingen aan het werkelijke proces	24
5.2 Validatie/optimalisatie model voor het regelproces	24
6. Ontwerp van een digitaal regelalgorithme	33
-----	
7. Praktische beoordeling regelalgorithme	52
-----	
8. Conclusies	67
-----	
9. Literatuur	68
-----	
10. Bijlage: Listing van de ontworpen PSI-modellen	69
-----	

## 1. Inleiding.

-----

De Nederlandse Energie Ontwikkelingsmaatschappij (NEOM) deed in samenwerking met tuinbouworganisaties en ingenieursburo's diverse haalbaarheidsstudies op het gebied van toepassing van rest- en afvalwarmte als alternatieve warmtebron (AW) voor tuinbouwkassen. De uitkomsten laten zien dat nu reeds in een aantal gevallen onder bepaalde voorwaarden rest- en afvalwarmte kunnen concurreren met aardgas. Deze voorwaarden verschillen van project tot project. Als alternatieve warmtebron kan echter ook een warmtepomp of warmte/krachtinstallatie gebruikt worden. De problemen die hierbij optreden zijn in velerlei opzicht gelijk aan die bij het gebruik van rest- en afvalwarmte. Als kenmerkende voorwaarde kan worden aangegeven, dat om economische redenen slechts een deel van het maximaal benodigde vermogen door een warmtepomp kan worden geleverd. Dat houdt in dat een afnemer naast een warmtepomp, onder omstandigheden waarbij de warmtevraag groot is, gebruik moet maken van een tweede warmtebron; in de praktijk is dit de aanwezige ketelinstallatie. Daarnaast is de temperatuur van een alternatieve warmtebron in het algemeen lager dan die van de conventionele warmtebron.

Onderzoek naar het gebruik van warmtepompen [Telle M.G. e.a., 1986] heeft aangetoond dat de warmtepomp op een afzonderlijk verwarmingssysteem dient te worden aangesloten. Wanneer echter twee verwarmingssystemen op gescheiden warmtebronnen zijn aangesloten, treden een aantal regeltechnische knelpunten op [Verwaayen P.W.T. e.a., 1986]. Vanaf januari 1987 vindt bij het IMAG regeltechnisch onderzoek plaats, mede gefinancierd door het Projectbeheerbureau Energie Onderzoek (PEO). De titel van dit project is: Regeltechnisch onderzoek naar het toepassen van twee warmtebronnen voor het verwarmen van kassen.

Het experimentele deel van het onderzoek wordt uitgevoerd in de nieuwe Energiekas die is gesitueerd op het IMAG-terrein, te weten afdeling 6 en 7.

In afdeling 6 wordt de alternatieve warmte aangesloten op een tubyleen-net ingegoten in een betonvloer, die hierdoor tevens dient als verwarmingssysteem. Een net met gevinde aluminium pijpen wordt hier gevoed met ketelwarmte.

Voor afdeling 7 bestaat het verwarmingssysteem uit een net van gevinde aluminium pijpen gevoed door alternatieve warmte, in combinatie met een 51-mm stalen pijpen net aangesloten op ketelwarmte. Deze opzet biedt een simpele oplossing aan tuinders wier bestaande kas is voorzien van 51-mm stalen pijpen, aangesloten op de eigen ketel. Door een relatief eenvoudige ingreep, welke het aansluiten van een tweede net met aluminium pijpen op alternatieve warmte omvat, wordt de totale installatie geschikt voor de toepassing van twee warmtebronnen. In dit rapport wordt het onderzoek in afdeling 7 beschreven (pijpverwarmingssystemen).

## 2. Beschrijving onderzoekfaciliteiten.

-----

Alvorens de verwarmingsinstallatie in afdeling 7 te beschrijven zal worden ingegaan op de uitgangspunten toegepast bij het ontwerp hiervan. De uitgangspunten zijn in principe ontleend aan de eerder genoemde haalbaarheidsstudies en dienen als randvoorwaarden bij dit onderzoek.

1. Het warmteverlies bedraagt maximaal 180 W/m<sup>2</sup> grondoppervlak.
2. Van de ontwerpcapaciteit wordt maximaal 30 %, dus 54 W/m<sup>2</sup> geleverd door de gesimuleerde AW-bron.
3. Het water afkomstig van deze AW-bron en de ketel wordt aangevoerd met overeenkomstige temperatuurwaarden uit de praktijk (maximaal 68 oC aanvoer).
4. Er wordt gestreefd naar een zo laag mogelijke retourtemperatuur van het verwarmingssysteem dat is aangesloten op de AW-bron (lager dan 40 oC).

### Verwarmingsinstallatie afdeling 7.

De gesimuleerde AW-bron is in deze afdeling aangesloten op een net (16 strangen) met gevinde aluminium pijpen (ALCOA- pijpen van 50 mm hoog). De regeling bestaat uit een menginjectiesysteem (drieweg-regelklep met kortsluitleiding). Indien noodzakelijk wordt ketelwarmte ingebracht door middel van een net (16 strangen) stalen pijpen van 51 mm diameter. Ook de regeling hiervan is uitgevoerd als menginjectieregeling.

Naast dit systeem is een verwarmingssysteem geïnstalleerd van kunststof slangen ten behoeve van de matverwarming van de substraatteelt. Aangezien het hier ook om lagetemperatuurverwarming gaat, wordt ook dit systeem door de AW-bron gevoed.

De afdeling is verder voorzien van:

- Een energie- en een schaduw scherm (gedurende de nacht worden beide voor energiebesparing gebruikt).
- Een CO<sub>2</sub>-gas doseerinrichting voor zuivere CO<sub>2</sub>.
- Een plantvoedings- en watergeefstelsel (substraatcomputer).
- Een ventilatiesysteem met luchtramen (dubbelzijdige nokluchting).

De bouwkundige kenmerken van de kas waarin het onderzoek wordt uitgevoerd zijn:

type constructie : Venlo met kappen van 3.20 m en een tralieligger  
 kolomafstand : 4 m in de nokrichting en 6.4 m loodrecht erop  
 goothoogte : 3.7 m boven maaiveld  
 afm. afdeling : 24 m in de nokrichting, 12.8 m loodrecht daarop  
 beglazing : in het dek enkel glas, in de gevel 2 x enkel glas

Voor een meer gedetailleerde beschrijving van de constructie van de kas met de bijbehorende verwarmingssystemen wordt verwezen naar [Knies P. e.a., 1984].

Voor de regeling en sturing van de onderzoekcompartimenten wordt gebruik gemaakt van de bestaande decentrale kasklimaatregeling (Gieling T.H. e.a., 1979). Deze klimaatbesturing bestaat uit een centraal opgestelde PDP 11/73 computer, bij elk compartiment een KuP (KasmicroProcessor) en een MuP (Multiplexing microProcessor), die functioneert als multiplexer voor de KuP's en als meetopnemer voor het

weerstation. Een KuP heeft 48 stuurrelais (actuators) en maximaal 64 meetkanalen. Het kasklimaatprogramma in de PDP 11/73 handelt in een tijdcyclus van 120 sec. de volgende acties sequentieel per kas af (Meurs W.Th.M. van, 1980):

- Het opvragen en binnenlezen van de meetdata.
- Een plausibiliteitscheck en filtering van de ingekomen data.
- Setpoint en stuursignaalberekeningen door de geïmplementeerde regelalgorithmen.
- Diskopslag van data.
- Verzenden van de berekende stuursignalen.



### 3. Beschrijving regeltechnisch onderzoek.

-----

#### 3.1 Randvoorwaarden binnen het onderzoek.

De condities waaronder alternatieve warmte wordt aangeboden, kunnen sterk uiteenlopen. Er zijn echter belangrijke overeenkomsten te onderscheiden, zoals de lage aanvoertemperaturen, de noodzaak tot aansluiting op afzonderlijke verwarmingssystemen en de dekking van een bepaalde deelbelasting. Binnen het kader van dit onderzoek zijn de volgende randvoorwaarden gesteld:

- De aanvoertemperaturen blijven beneden 68 oC. Doordat de inzet van bijvoorbeeld een warmtepomp in hoge mate wordt beïnvloed door de hoogte van de te leveren aanvoertemperatuur, zijn voor de verwarmingssystemen lagetemperatuursystemen gekozen.
- De retourtemperatuur van het water teruggeleverd aan de AW-bron moet worden begrensd op een instelbare maximale temperatuur.
- De warmtelevering van de gesimuleerde AW-bron is maximaal 30 % van de ontwerpbelasting.

#### 3.2 Regeltechnische eisen verwarmingsregeling.

Voor de regeling van de luchttemperatuur in een kas kan men in het algemeen de volgende regeltechnische eisen stellen (Verwaayen P.W.T., 1987):

- De kasluchttemperatuur mag niet significant (een aantal graden) beneden het dag-setpoint komen.
- Het setpoint voor de kasluchttemperatuur moet 's nachts nauwkeurig gevolgd kunnen worden. Indien 's nachts een energiescherm gesloten is, heeft het buitenklimaat maar een geringe invloed op de kasluchttemperatuur.
- Er dient zo min mogelijk overshoot op te treden, zeker als deze overshoot een gevolg is van de warmte geleverd door een van de verwarmingssystemen.
- Setpoint-veranderingen dienen nauwkeurig gevolgd te worden, om een optimale gewasgroei te bewerkstelligen.
- Het regelsysteem moet voldoende demping bezitten. Het doorschot bij stapvormige verstoringen mag niet meer dan 25 % van de verstoring bedragen.
- De statische afwijking dient naar nul te gaan. De statische afwijking is de afwijking van de gewenste waarde minus de gemeten waarde, indien de tijd naar oneindig gaat.
- Instabiliteit van het geregelde proces mag niet optreden. Wanneer parametervariëaties of een veranderend buitenklimaat een storende invloed op het geregelde proces uitoefenen, mag dit niet tot oscillatie van de geregelde grootte leiden.

Voor het regelen van twee warmtebronnen aangesloten op regeltechnisch uiteenlopende verwarmingssystemen, worden een aantal specifieke eisen geformuleerd. Deze eisen zijn afgestemd op de gestelde randvoorwaarden. Bij de gecombineerde regeling moet een optimaal gebruik van de AW-bron worden nagestreefd.

- De AW-bron dient door het regelalgoritme zo gelijkmatig mogelijk te worden aangestuurd. Doordat het rendement van een AW-bron zoals een warmtepomp in grote mate afhangt van de warmtelevering van het verwarmingssysteem dat hierop is aangesloten, is het gewenst onnodige fluctuaties in de sturing van dit systeem te vermijden.

Dit is in tegenstelling met de gestelde algemene regeltechnische eisen. De snelheid van een regelsysteem gaat namelijk altijd gepaard met grote variaties in sturingen van dit systeem. Het te ontwerpen regelalgoritme zal dus een compromis-oplossing moeten bevatten, die voor beide eisen aanvaardbaar is.

- De retourtemperatuur van het verwarmingssysteem dat is aangesloten op de AW-bron, dient een instelbare maximale waarde zo min mogelijk te overschrijden. Indien overschrijding plaatsvindt, dient de retourtemperatuur op de vastgestelde temperatuur geregeld te worden. Dit zou, boven het gebruikelijke uit bedrijf nemen van bijvoorbeeld de warmtepomp-installatie, een belangrijke bijdrage moeten leveren aan de verhoging van het aantal draaiuren.
- Indien geen andere randvoorwaarden in het geding komen, mag de ketelwarmtebron pas worden aangesproken wanneer het verwarmingssysteem, dat is aangesloten op de warmtepomp, volledig is uitgestuurd.

### 3.3 Gewaskeuze.

Bij het maken van de gewaskeuze hebben de gewenste dagtemperatuur en het temperatuurverschil tussen dag- en nachtniveau een rol gespeeld. Een verwarmingssysteem laat zich het beste beoordelen als het veel warmte moet leveren. De best mogelijke voorwaarden hiervoor worden uiteraard geboden bij een gewas met een hoge teelttemperatuur.

Het regeltechnisch gedrag van een verwarmingssysteem laat zich het best beoordelen indien grote dynamische overgangen plaatsvinden. De thermische traagheid van het systeem is namelijk van grote invloed op de regelbaarheid ervan. Bij een groot verschil tussen nacht- en dagtemperatuur komt deze eigenschap het best naar voren. Het gewas paprika komt in hoge mate aan deze voorwaarden tegemoet.

### 3.4 Werkwijze onderzoek.

Het gebruik van simulatiemodellen ten behoeve van de ontwikkeling van een optimaal regelalgoritme vormt in dit onderzoek een belangrijk gedeelte.

Allereerst zal van het te regelen proces een theoretisch model worden ontwikkeld. Hierbij worden de afzonderlijke procesdelen beschreven door wiskundige betrekkingen. Deze betrekkingen (differentiaalvergelijkingen) geven een dynamische beschouwing van een proces, en worden via Laplace-transformaties omgezet in regeltechnische overdrachtsfuncties (regeltechnisch model). Dit model wordt met behulp van het simulatiepakket PSI (Interactive Simulation Program) omgebouwd tot een simulatiemodel. Hierna vindt validatie van het model plaats aan de hand van systeemmetingen. Deze metingen bestaan uit stapvormige veranderingen in de aansturing van de regelkleppen van de verwarmingssystemen. De optredende responsie van de luchttemperatuur, de aanvoer- en retourwatertemperaturen dienen ter optimalisatie van de systeemp parameters van het simulatiemodel. Nadat het model het werkelijke proces voldoende nauwkeurig benadert, wordt het regelalgoritme ontworpen. Dit algoritme bestaat uit differentievergelijkingen (digitale regelacties) en conditionele statements (randvoorwaarden en eisen). Het ontworpen algoritme wordt eveneens omgevormd tot een simulatiemodel, dat wordt geïmplementeerd in het gevormde

simulatiemodel van het proces. Aan de hand van verstoringen van het buitenklimaat zal het regelalgorithme worden geevalueerd. Door het aanbrengen van setpointwijzigingen kan in principe een daglengte volledig worden gesimuleerd. Het verlagen van de kritische retourtemperatuur van het verwarmingssysteem gevoed door de AW-bron, zal worden gevolgd door acties van het reductiealgorithme. Op deze wijze kan ook hier beoordeling en optimalisatie plaatsvinden. Indien het algorithme, getest in vele belastingssituaties, werkt conform de gestelde eisen, zal het worden vertaald in een Fortran regelmodule. Deze module wordt dan geïmplementeerd in het decentrale kasklimaatregelsysteem. Hierna wordt overgegaan tot de beoordeling van het werkelijke regelproces aan de hand van optredende belastingsvariaties en dynamische overgangen.

#### 4. Ontwerp van een simulatiemodel voor het regelproces.

-----

##### 4.1 Begrenzungen (randvoorwaarden) model.

Het klimaat in een kas wordt door een groot aantal factoren bepaald. Factoren die men zelf in de hand heeft, maar ook een groot aantal die men slechts in zeer geringe mate indirect kan beïnvloeden. Hierbij valt te denken aan bijvoorbeeld zon-instraling. Door toepassing van een schaduw scherm en het ventileren met behulp van luchtramen, kan getracht worden de luchttemperatuur in de kas enigszins te begrenzen. Maar neemt de windsnelheid toe, valt plotseling een hoeveelheid regen etc. dan kan op geen enkele wijze worden voorkomen dat de belasting van de kas hierdoor wordt gewijzigd. Ook van binnen uit kan de belasting van de kas variëren, bijvoorbeeld door de hoeveelheid verdamping van de aanwezige planten, condensatie tegen het koude dek etc. Met andere woorden: het klimaat in een kas is afhankelijk van een groot aantal storende factoren. Hierin ligt de basis voor het ontwerp van een model voor de regeling van de luchttemperatuur. De storende invloeden die zich manifesteren in een variatie van de luchttemperatuur in de kas, worden in het model ook als zodanig opgevat. In dit regeltechnisch model wordt dus de relatie luchttemperatuur, ten gevolge van variaties in de aansturingen van de verschillende verwarmingssystemen beschreven. Bij de modelvorming worden de volgende uitgangspunten gekozen:

- De warmteoverdrachtscoëfficiënt van de kas (K-waarde) is alleen afhankelijk van het schermen. De K-waarde vertegenwoordigt de warmteoverdracht van het kasdek naar buiten en van de zijgevels naar aangrenzende compartimenten (Breuer J.J.G., 1987).
- De warmteafgifte van de verwarmingspijpen wordt geconcentreerd in een gemiddelde (rekenkundig) buistemperatuur.
- Bij de berekening van de convectieve warmteoverdracht van de verwarmingspijpen wordt de buitenluchtdruk gelijk gesteld aan 760 mm Hg.
- De stralingstemperatuur, benodigd voor het berekenen van de hoeveelheid stralingswarmte afgegeven door de pijpen, wordt gelijk gesteld aan de momentane luchttemperatuur.
- De grondtemperatuur op 75 cm diepte wordt binnen een etmaal constant verondersteld.
- Het niet-lineaire gedrag van de regelkleppen zal in de modelvorming worden opgenomen.
- De beschrijving van de luchttemperatuur in de kas heeft betrekking op een vierkante meter teeltoppervlak.

##### 4.2 Model voor de beschrijving van het regelproces.

De modelvorming van het regelproces valt uiteen in een aantal deelmodellen (zie FIG. 4.1). De ingangssignalen van het regelproces zijn de stuursignalen voor de mengkleppen (STKLM/STKLS). De klepstand van de mengklep is het uitgangssignaal van het betreffende model 'MENGKLEP AW/KW'. Het model 'TANV1/2' heeft als uitgang de aanvoertemperatuur en als ingang de klepstand, de retourwatertemperatuur TRET1/2 van het betreffende verwarmingssysteem en de aanvoertemperatuur van de bijbehorende warmtebron. Het model voor de luchttemperatuur in de kas heeft als uitgangssignalen uiteraard

MODEL REGEELPROCES.

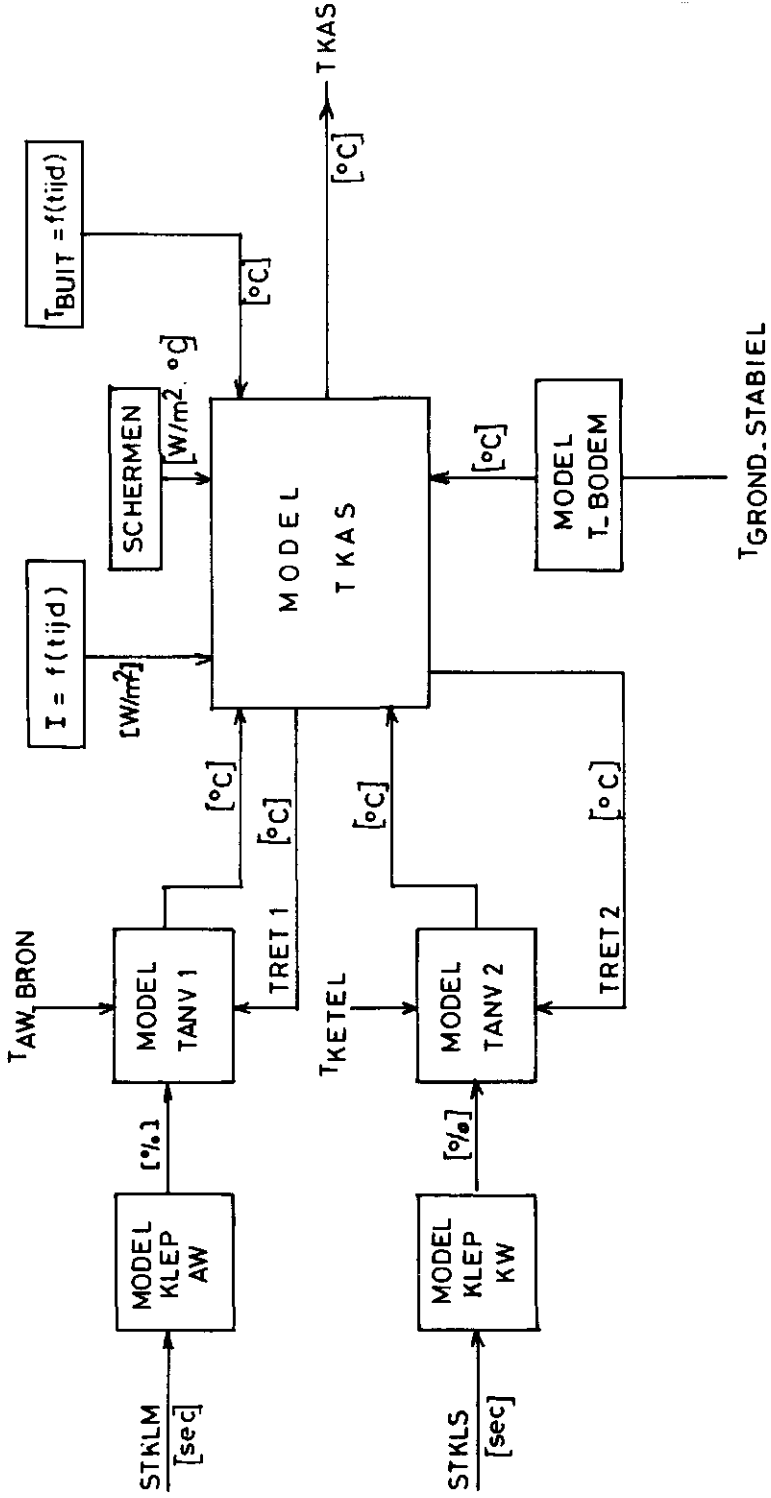


FIG. 4.1

TKAS, maar ook TRET1/2. De belasting van de kas wordt gevormd door een model voor de beschrijving van de bodemtemperaturen 'TBODEM', buitentemperatuur 'TBUIT', de hoeveelheid instraling 'INSTR' en het openen en sluiten van schermen 'SCHERMEN'.

#### 4.2.1 Model voor de overdrachtsfunctie van de mengklep.

Met de overdrachtsfunctie van de mengklep wordt bedoeld: op welke wijze reageert de klepstand (uitgangsvariabele) in relatie tot de aansturing (ingangsvariabele). De stappenmotor die de mengklep bedient, wordt aangestuurd vanuit een kasmicroprocessor (KuP). De stuurtijd van dicht tot maximaal open is 180 sec. De mengklep bezit houd-werking, wat betekent dat de laatste stand behouden blijft indien het stuursignaal nul is. De overdrachtsfunctie van de mengklep vertoont echter een niet-lineair gedrag. In het blokschema van de overdrachtsfunctie (FIG. 4.2) is deze niet-lineariteit gekarakteriseerd in HP4.

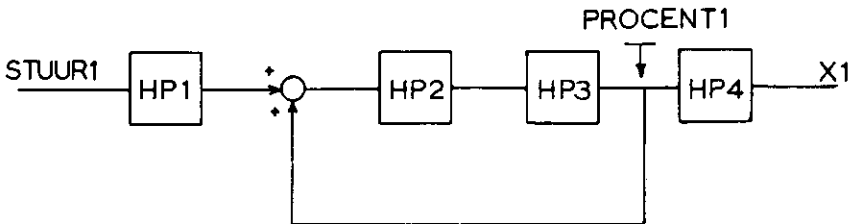


FIG. 4.2

Hierin is:

- HP1 : Factor 100 / looptijd klepmotor [%/sec]
- HP2 : Niet-lineair element (Limiter klepstand 0-100%) [-]
- HP3 : Looptijd gelijk aan sampletijd regelproces (120 sec) [sec]
- HP4 : Niet-lineaire overdracht klepkarakteristiek [1/%]
- STUUR1 : Stuursignaal voor de klepmotor [sec]
- PROCENT1: Klepstand bij lineaire klepkarakteristiek [%]
- X1 : Stand van de mengklep {0,1}, dit is de ingangsvariabele voor het model voor de aanvoertemperatuur TANV1 (formule 4.2.1).

Parameters voor de overdrachtsfunctie van de mengklep.

De waarden van de parameters zijn voor beide verwarmingssystemen

gelijk en zijn:

- De looptijd van de klepmotor bedraagt 180 sec.
- De niet-lineaire overdracht van de klepkarakteristiek is gegeven in FIG. 4.3

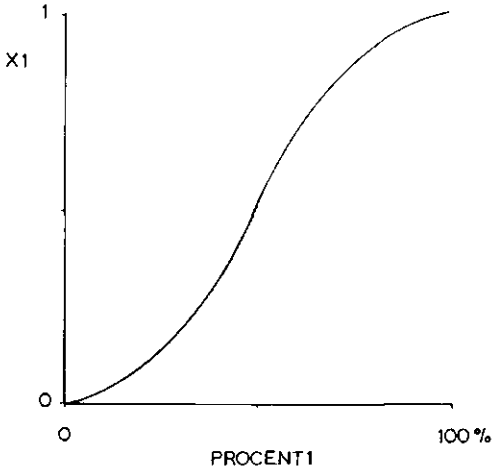


FIG. 4.3

De niet-lineaire overdracht van de klepkarakteristiek is met behulp van een functiegenerator (PSI-functieblok) te vormen.

#### 4.2.2 Model voor de beschrijving van de aanvoertemperatuur.

De beschrijving geeft het verloop van de aanvoertemperatuur (TANV) van het verwarmingssysteem als functie van de stand van de mengklep. Afgezien van de waarde van de parameters, geldt voor beide verwarmingssystemen een soortgelijke beschrijving, zodat hier alleen voor het gevinde aluminium pijpen-net is gekozen (AW-bron). De klepregeling bestaat uit een menginjectiesysteem, dat met de bijbehorende waterstromen is weergegeven in FIG. 4.4

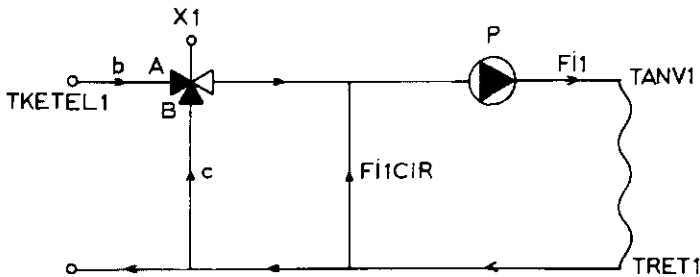


FIG. 4.4

Hierbij is:

X1 : Stand van de mengklep (0,1)  
 FI1CIR : Kortsluitdebiet  
 FI1 : Rondcircularend debiet  
 P : Circulatiepomp  
 TANV1 : De aanvoertemperatuur van het alternatieve warmtenet (AW)  
 TRET1 : De retourtemperatuur van het AW-net  
 b : Geinjecteerde waterstroom uit de AW-bron ( $X*(1-FI1CIR)$ )  
 c : Circulatiestroom door B-poort van de mengklep  
 ( $(1-FI1CIR)*(1-X)$ )  
 TKETEL1 : Temperatuur van de alternatieve warmtebron.

In het rapport worden met indices 1 alle parameters bedoeld die betrekking hebben op het AW-net/bron, met indices 2 die van het KW-net/bron.

Door uit de warmtestromen TANV1 te elimineren, volgt formule 4.2.1:

$$TANV1 = X1(1-FI1CIR)TKETEL1 + (1-X1)(1-FI1CIR)TRET1 + FI1CIR.TRET1$$

De aanvoertemperatuur is afhankelijk van X1, TKETEL1, FI1CIR en TRET1. Nu is X1 een regelbare grootte, TKETEL1 en FI1CIR procesparameters maar TRET1 afhankelijk van de warmteafgifte van het verwarmingsnet.

#### 4.2.3 Model voor de beschrijving van de luchttemperatuur in de kas.

Allereerst zal de parameter TRET1 worden afgeleid, die wordt gebruikt als ingangssignaal voor het model 'TANV1'. Voor de beschrijving van TRET1 wordt een stuk pijp beschouwd ter grootte dx. De warmteafgifte wordt gekarakteriseerd in de parameter ALFA1 (warmteoverdrachtscoëfficiënt). In FIG 4.5 is dit schematisch weergegeven:

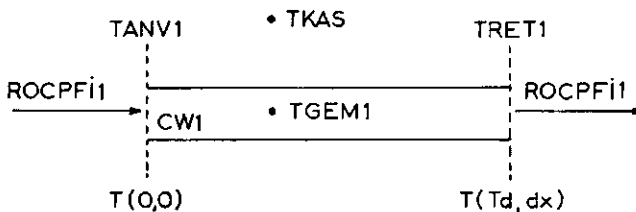


FIG. 4.5

Waarin:

RO : Soortelijke massa van water [Kg/m<sup>3</sup>]  
 CP : Soortelijke warmte van water [J/Kg.K]  
 FI1 : Debiet door de pijp [m<sup>3</sup>/uur.m<sup>2</sup>kas]  
 CW1 : Warmtecapaciteit van de pijp en het water in de pijp



[J/K.m<sup>2</sup>kas]  
 TKAS : Luchttemperatuur in de kas [oC]  
 T(0,0) : Watertemperatuur tijdstip=0 en lengte pijp=0 (TANV1)  
 T(Td,dx): Watertemperatuur tijdstip=Td (omlooptijd van het  
 verwarmingssysteem) en lengte pijp is dx (TRET1)  
 TGEM1 : Gemiddelde watertemperatuur (TANV1 + TRET2)/2.

Van dit stuk verwarmingspijp kan de warmtebalans genoteerd worden:

$$\text{Opgenomen} = \text{Qin} - \text{Quit}$$

$$\text{CW1} \cdot \frac{dT_{\text{GEM1}}}{dt} = \text{ROCPFI1}(\text{TANV1} - \text{TRET1}) - \text{ALFA1}(\text{TGEM1} - \text{TKAS}) \quad 4.2.2$$

Wanneer voor de bepaling van TGEM1 de aanvoertemperatuur TANV1 constant wordt verondersteld, dan gaat formule 4.2.2 over in:

$$\text{CW1} \cdot \frac{dT_{\text{RET1}}}{dt} = \text{ROCPFI1}(\text{TANV1} - \text{TRET1}) - \text{ALFA1}(\frac{\text{TRET1}}{2} + \frac{\text{TANV1}}{2} - \text{TKAS})$$

Met voor  $\text{ROCPFI1} = C1$  en  $t = \frac{\text{CW1}}{2C1 + \text{ALFA1}}$  geldt nu:

$$t \cdot \frac{dT_{\text{RET1}}}{dt} + \text{TRET1} = \frac{2C1 - \text{ALFA1}}{2C1 + \text{ALFA1}} \text{TANV1} + \frac{2\text{ALFA1}}{2C1 + \text{ALFA1}} \text{TKAS}$$

Hieruit volgt voor de Laplace-getransformeerde overdrachtsfunctie:

$$\text{TRET1}(s) = \frac{\frac{2C1 - \text{ALFA1}}{2C1 + \text{ALFA1}} \text{TANV1}(s) + \frac{2\text{ALFA1}}{2C1 + \text{ALFA1}} \text{TKAS}(s) - Td \cdot s}{t \cdot s + 1} \cdot e \quad 4.2.3$$

De omlooptijd van het verwarmingssysteem wordt in rekening gebracht door de looptijd Td. Aan de hand van formule 4.2.1 en 4.2.3 kunnen de volgende opmerkingen worden gemaakt:

- De overdrachtsfunctie vertoont een parallel eerste orde gedrag, wat betekent dat de tijdresponsie niet met de bekende inverse Laplace-transformatieregels te verkrijgen is.
- De retourtemperatuur TRET1 is afhankelijk van 2 procesvariabelen namelijk TANV1 en TKAS.
- Door het menginjectiesysteem is TANV1 eveneens voor een gedeelte afhankelijk van TRET1. Dit gedeelte wordt bepaald door de grootte van het kortsluitdebiet. Maar dit houdt ook in dat TANV1 dynamisch afhankelijk is van TRET1. Aangezien TRET1 traag zal reageren op klepstandveranderingen, zal ook de regelbaarheid van TANV1 als regelparameter hierdoor sterk worden beïnvloed. Wordt echter het kortsluitdebiet te laag, dan zal bij een gelijk blijvende warmteafgifte van de pijpen het verschil tussen TANV1 en TRET1 te groot worden.
- Indien de warmteoverdrachtscoëfficiënt van de pijpen ALFA1 toeneemt, zal de tijdconstante van het systeem t afnemen; TRET1 reageert dan sneller op veranderingen van TANV1 en TKAS.
- De warmtecapaciteit van de pijpen en het water hierin (CW1) is

eveneens bepalend voor de snelheid van het proces. Hierdoor zal het gevinde aluminium pijpennet veel sneller reageren als het 51 mm stalen pijpennet.

- Een vergroting van het rondcircularerend debiet heeft ook een gunstige uitwerking op de snelheid van het proces.

Warmte-afgifte van kasverwarmingspijpen vindt plaats via convectie en straling. De getalwaarden voor de warmte-overdracht worden ontleend uit onderzoek van A. Stoffers (IMAG, afd. Fysische techniek). Voor getalwaarden betreffende stralingsoverdracht wordt verwezen naar de VDI-Warmeatlas of daarvan afgeleide handboeken. De convectieve overdracht voor een laaghangende pijpenbundel met 4 pijpen per kap (Venlo-type) wordt beschreven door:

$$\text{ALFACON} = 6.516 \cdot \sqrt[4]{\frac{(\text{TGEM} - \text{TKAS})}{\text{TKAS} \cdot d}} \cdot \sqrt{\frac{B}{760}} \quad \text{W/m}^2\text{.K} \quad 4.2.4$$

Waarin:

ALFACON : Convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt [W/m<sup>2</sup>.K]  
 TKAS : Absolute luchttemperatuur [K]  
 TGEM : Absolute gemiddelde pijptemperatuur [K]  
 d : Pijpdiameter [m]  
 B : barometerstand [mm Hg]

De warmteoverdracht door straling wordt gegeven door:

$$\text{QSTR} = \text{EPS} \cdot \text{A}_{\text{pijp}} \cdot \text{SIGM} \cdot (\text{TGEM}^4 - \text{TKAS}^4) \quad [\text{W/m}^2\text{kas}] \quad 4.2.5$$

Hierin is:

QSTR : Hoeveelheid warmte door stralingsoverdracht [W/m<sup>2</sup>kas]  
 EPS : Emissiecoëfficiënt pijp  
 A<sub>pijp</sub> : Oppervlakte pijp [m<sup>2</sup>pijp/m<sup>2</sup>kas]  
 SIGM : Constante van Boltzmann 5.67E-8 [W/m<sup>2</sup>.K ]

Met behulp van de hoeveelheid warmte afgegeven door straling, is ook hiervoor een warmteoverdrachtscoëfficiënt ALFAST te bepalen.

$$\text{ALFAST} = \frac{\text{QSTR}}{\text{TGEM} - \text{TKAS}} \quad [\text{W/m}^2\text{kas.K}]$$

Voor de totale overdrachtscoëfficiënt (convectie en straling) geldt:

$$\text{ALFA} = \text{ALFACON} + \text{ALFAST} \quad [\text{W/m}^2\text{kas.K}]$$

Uit de formules 4.2.4 en 4.2.5 blijkt dat de warmte-afgifte van de pijpen niet constant is. Het model berekent bij elke integratiestap opnieuw de warmte-afgifte van de pijpen met de op dat moment berekende overdrachtscoëfficiënten. Een interessante waarde voor warmteoverdrachtscoëfficiënt is die bij de ontwerpconditie, bijvoorbeeld TKAS = 20 oC, TBUIT = -10 oC. Hiermee wordt dan het maximale vermogen dat de verwarmingsinstallatie kan leveren berekend.

Procesparameters gevinde aluminium pijpennet.

In FIG. 4.6 is een afbeelding gegeven met de bijbehorende maten van de gevinde aluminium buis. Er liggen 4 buizen per kap van 3.2 m in de kas, zodat het aantal meters pijp per m<sup>2</sup> kas gelijk is aan 1.25 mpijp/m<sup>2</sup>kas.

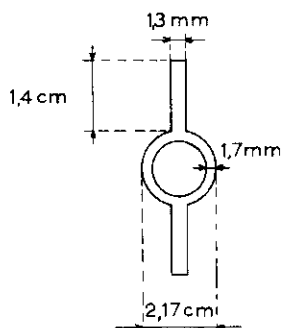


FIG. 4.6

Voor formule 4.2.1 zijn de volgende procesparameters van belang:

- FI1CIR = 0.3 (Door metingen aan het proces bepaald)
- RO = 1000 [kg/m<sup>3</sup>] (Soortelijke massa water)
- CP = 4180 [J/kg.K] (Soortelijke warmte water)
- FI1 = 1.48E-3 [m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>kas.uur] (Rondcirculerend debiet)
- TKETEL1 = 80 [oC] (Aanvoertemperatuur alternatieve warmtebron)
- CW1 = (Cp-alu + Cp-water)\*aantal meter pijp/m<sup>2</sup>kas

$$Cp\text{-alu} = m\text{-alu} * sw\text{-alu}$$

$$m\text{-alu} = ro\text{-alu} * V\text{-alu} = 2.7E3 * 1.42E-4 = 0.38 \text{ [kg/mpijs]}$$

$$Cp\text{-alu} = 0.38 * 0.9 = 0.342 \text{ [kJ/kg.K]}$$

$$Cp\text{-water} = m\text{-water} * sw\text{-water}$$

$$m\text{-water} = ro\text{-water} * V\text{-water} = 1000 * 2.62E-4 = 0.262 \text{ [kg/mpijs]}$$

$$Cp\text{-water} = m\text{-water} * sw\text{-water} = 0.262 * 4180 = 1.07 \text{ [kJ/kg.K]}$$

$$CW1 = (0.342 + 1.07) * 1.25 = 1765 \text{ [J/K.m}^2\text{kas]}$$

Voor formule 4.2.3 geldt voor de omlooptijd van het gevinde aluminium pijpennet  $Td1 = 0.4$  [uur].

In formule 4.2.4 wordt de barometerstand B constant verondersteld op 760 mm Hg. Volgens opgave van de fabrikant van de alu-pijpen, kan de warmteoverdracht worden vergeleken met die van een ronde stalen pijp met een diameter van 33 mm. Door systeembeschouwingen is echter gebleken dat in dit model de constante 6.516, bij de gegeven diameter van 33 mm, in de formule 4.2.4 moet worden gewijzigd in 4.20. De emissiecoëfficiënt voor de aluminium pijp EPS1 in formule 4.2.5 is gelijk aan 0.9. Voor dezelfde formule geldt voor de oppervlakte van de pijp  $A_{pijpl} = 0.15$  [m<sup>2</sup>pijp/m<sup>2</sup>kas].

Parameters voor het stalen 51mm-net.

Op een zelfde wijze als voor het aluminiumnet kunnen soortgelijke parameters voor dit stalen-net worden berekend. Volstaan wordt hier met alleen de parameterwaarden te geven.

Voor het waterzijdig gedeelte geldt: FI2CIR = 0.74,

FI2 = 11.18 [m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>kas.uur].

De aanvoertemperatuur van de ketelwarmtebron TKETEL2 = 90 oC. De

parameter CW2 heeft de waarde 1.059E4 [J/K.m2kas]. De omlooptijd voor het stalen-net Td2 = 0.25 [uur]. Voor de bepaling van de convectieve warmteoverdracht (formule 4.2.4) is de constante 6.516 voor dit net correct. De emissiecoëfficiënt EPS2 = 0.9. Tenslotte geldt voor Apijp2 = 0.2 [m2pijp/m2kas]

Rekening houdend met de gestelde randvoorwaarden van het model kan voor de luchttemperatuur in de kas TKAS de warmtebalans als volgt worden genoteerd:

$$Q_{\text{opg}} = Q_{\text{verw1}} + Q_{\text{verw2}} - Q_{\text{bodem}} - Q_{\text{out}} + \text{HFI}$$

$$\frac{dTKAS}{dt} = \text{Ckas} \cdot \text{ALFA1}(\text{DELTA1}) + \text{ALFA2}(\text{DELTA2}) - \text{ALFA3}(\text{DELTA3}) - K(\text{DELTA4}) + \text{HFI}$$

In deze vergelijkingen is:

Qopg : Hoeveelheid opgeslagen warmte in de kas [W/m2kas]  
 Qverw1 : Hoeveelheid afgegeven warmte door het AW-net [W/m2kas]  
 Qverw2 : Hoeveelheid afgegeven warmte door het KW-net [W/m2kas]  
 Qbodem : Hoeveelheid afgegeven warmte naar de bodem [W/m2kas]  
 Qout : Warmteverlies van de kas naar buiten [W/m2kas]  
 HFI : Hoeveelheid netto voelbare warmte afkomstig van zon-instraling [W/m2kas].  
 Ckas : Warmtecapaciteit van kaslucht inclusief kasconstructie delen [J/K.m2kas]  
 ALFA1 : Warmteoverdrachtscoëfficiënt van het AW-net [W/m2kas.K]  
 ALFA2 : Warmteoverdrachtscoëfficiënt van het KW-net [W/m2kas.K]  
 ALFA3 : Warmteoverdrachtscoëfficiënt van de lucht naar de bodem, en omgekeerd [W/m2kas.K]  
 DELTA1 : Verschil van TGEM1 en TKAS [K]  
 DELTA2 : Verschil van TGEM2 en TKAS [K]  
 DELTA3 : Verschil van TKAS en TBODEM [K]  
 DELTA4 : Verschil van TKAS en TBUIT [K]  
 TBUIT : Buitentemperatuur [K]  
 K : Warmteoverdrachtscoëfficiënt van de kas [W/m2kas.K]

Verder uitgewerkt levert dit:

$$\frac{dTKAS}{dt} + TKAS = K10 \cdot TGEM1 + K20 \cdot TGEM2 + K30 \cdot TBUIT + KI$$

$$+ K40 \cdot TBODEM$$

$$\text{met voor } \frac{dTKAS}{dt} = \frac{C_{\text{kas}}}{NOEK10}, K10 = \frac{ALFA1}{NOEK10}, K20 = \frac{ALFA2}{NOEK10}, KI = \frac{HFI}{NOEK10}$$

$$K30 = \frac{K}{NOEK10}, K40 = \frac{ALFA3}{NOEK10}, NOEK10 = ALFA1 + ALFA2 + ALFA3 + K$$

Voor de Laplace-getransformeerde overdrachtsfunctie geldt nu formule 4.2.6:

$$TKAS(s) = \frac{(K10.TGEM1+K20.TGEM2+K30.TBUIT+KI+K40.TBODEM) \cdot e^{-Tdk \cdot s}}{tkas \cdot s + 1}$$

De factor Tdk karakteriseert de looptijd die optreedt indien een van de ingangsvariabelen zich wijzigt. Ook hier valt de overdracht uiteen in een aantal parallelle eerste orde systemen. De variabelen TBUIT, HFI en TBODEM vormen samen de belasting van de kas. Door hierin variaties aan te brengen, kunnen allerlei storingen van buiten de kas gesimuleerd worden.

Het sluiten en openen van het energiescherm wordt bij benadering gesimuleerd door het vertraagd wijzigen van de K-waarde van de kas: de reductie van de K-waarde is als functie van de tijd een eerste orde proces.

Parameters voor de luchttemperatuur in de kas.

De luchttemperatuur in de kas wordt beschreven volgens formule 4.2.6 De in te geven parameters hiervoor zijn:

- Ckas = 11.19E3 [J/K.m<sup>2</sup>kas], dit is de waarde voor de warmtecapaciteit van de lucht in de kas inclusief de constructiedelen. Deze waarde is drie maal zo groot als de warmtecapaciteit van de lucht in de kas (Ooster A. van 't, 1983).
- De K-waarde van de kas is afhankelijk van een groot aantal factoren (Breuer J.J.G., 1987). Parameters die hierbij een rol spelen zijn bijvoorbeeld het verschil binnen-buitentemperatuur, schermstanden, windsnelheid, etc. Bij geopende schermen is de K-waarde ongeveer 8, bij gesloten schermen 3.5 [W/m<sup>2</sup>kas.K].

#### 4.2.4 Model voor de beschrijving van de bodemtemperatuur.

Uit praktijkmetingen blijkt dat bij een groot verschil tussen de dag- en nachttemperatuur van de lucht in de kas, de bodemtemperatuur vanaf 20 cm diepte gedurende de periode van een etmaal constant blijft. Voor de modellering van de bodemtemperatuur wordt de bodem gediscrètiseerd in 5 lagen: een toplaag van 1 cm dikte bedekt met folie en hieronder 3 lagen van 2, 8 en 16 cm dikte. Onder deze vier relatief dunne lagen, wordt een laag van 1 m dikte beschouwd, met een gedurende de simulatieperiode constante temperatuur TGROND. In deze periode worden eveneens de warmtegeleidingsfactoren in de verschillende lagen constant verondersteld. Voor de toplaag met temperatuur TBODEM, geldt:

$$Cbod \cdot \frac{dT_{BODEM}}{dt} = ALFA3 \cdot (TKAS - TBODEM) - ALFAD \cdot (TBODEM - TBOD2)$$

Uitgewerkt levert dit:

$$tB \cdot \frac{dT_{BODEM}}{dt} + TBODEM = K50 \cdot TKAS + K60 \cdot TBOD2 \quad 4.2.7$$

met  $K50 = ALFA3/NOEK5$ ,  $K60 = ALFAD/NOEK5$ ,  $NOEK5 = ALFA3 + ALFAD$

$$\text{en } tB = \frac{Cbod}{ALFA3 + ALFAD}$$

Waarin geldt dat:

Cbod : Warmtecapaciteit van de 1 cm dikke grondlaag [J/K.m2kas]  
 ALFA3 : Warmteoverdrachtscoëfficiënt TKAS -> TBODEM [W/K.m2kas]  
 ALFAD : Geleidingsoverdracht van TBODEM -> TBOD2 [W/K.m2kas]  
 TBOD2 : Bodemtemperatuur van de laag van 2 cm dikte [K]

De warmteoverdrachtscoëfficiënt ALFA3 is echter geen constante. Er onderscheiden zich twee wezenlijk verschillende situaties: de bodemtemperatuur is warmer dan de luchttemperatuur in de kas en omgekeerd. Wanneer TBODEM < TKAS, dan is de convectieve warmteoverdracht veel kleiner door de zich vormende koude luchtlagen op de bodem van de kas. Is TBODEM > TKAS, dan wordt de convectieve overdracht sterk verbeterd door de nu opstijgende warme lucht. Voor het model wordt ALFA3 dus afhankelijk van (TKAS - TBODEM) berekend.

Uit formule 4.2.7 volgt voor de Laplace-getransformeerde overdrachtsfunctie:

$$TBODEM(s) = \frac{K50.TKAS(s) + K60.TBOD2(s)}{tB.s + 1} \quad 4.2.8$$

Voor de beschrijving van de onderliggende lagen met temperaturen van respectievelijk TBOD2, TBOD3, TBOD4 en TGROND, wordt hier volstaan met:

$$CBOD2 \frac{dTOD2}{dt} = ALFAD(TBODEM - TBOD2) - ALFAD2(TBOD2 - TBOD3)$$

$$CBOD3 \frac{dTOD3}{dt} = ALFAD2(TBOD2 - TBOD3) - ALFAD3(TBOD3 - TBOD4)$$

$$CBOD4 \frac{dTOD4}{dt} = ALFAD3(TBOD3 - TBOD4) - ALFAD4(TBOD4 - TGROND)$$

Waarin:

CBOD(x) : De warmtecapaciteit voor de bijbehorende laag (x).  
 ALFAD(i) : De warmtegeleidingscoëfficiënt tussen laag (i) en laag (i+1).

Parameters voor de beschrijving van de bodemtemperatuur.

De samenstelling van de grond, aangenomen dat de grond bedekt met folie tamelijk vochtig blijft, wordt geschat op 30 % vochtgehalte en een vaste stofgehalte van 50 % (Ooster A. van 't, 1983). De hieruit te berekenen warmtecapaciteit van de toplaag van de bodem bedekt met folie  $Cbod = 2.43E4$  [J/K.m2kas].

De geleidingscoëfficiënt van deze grond  $LABDA = 0.64$  [W/m.K]. De bodemtemperatuur TBODEM geldt als gemiddelde temperatuur in de bovenste laag van 1 cm dikte. Hierdoor geldt voor de gemiddelde afstand tot de plaats waar TBOD2 heerst  $d = 1.5$  cm. Hiermee wordt

ALFAD = (LABDA/d)\*aantal meters/m<sup>2</sup>kas = 42.66 [W/K.m<sup>2</sup>kas]. Voor de bepaling van de warmteoverdracht bodem -> kaslucht wordt uitgegaan van de formule (Vennegoor op Nijhuis J.A.B, 1986):

$$ALFA3 = ALFABTK \cdot (TKAS - TBODEM)^{1/3} \quad 4.2.9$$

Voor de overdracht kaslucht -> bodem wordt uitgegaan van dezelfde formule, echter parameter ALFABTK wordt nu ALFATKB. Aan de hand van systeemmetingen die plaats hebben gevonden, zijn deze parameters geoptimaliseerd. De waarden hiervoor zijn: ALFABTK = 4.91 en ALFATKB = 2.0. Voor de onderliggende lagen kan op een zelfde wijze worden gevonden CBOD2=4.86E4, CBOD3=19.44E4, CBOD4=38.88E4, ALFAD2=25.60, ALFAD3=5.33 en ALFAD4=1.1.

#### 4.3 Model voor de beschrijving van het buitenklimaat.

Het buitenklimaat, dat de belasting vormt voor de kas, wordt in dit regeltechnisch model vereenvoudigd tot een buitenluchttemperatuur (TBUIT) en een hoeveelheid straling (IB). Allereerst volgt een beschrijving voor TBUIT.

In principe wordt het te vormen simulatiemodel zodanig opgezet dat een simulatierun bestaat uit precies een daglengte (24 uur). Op deze wijze kunnen alle kritieke dynamische overgangen van de regeling worden beschouwd. De basis van de functie vormt een sinusvormig signaal met een periode van 24 uur. De amplitude van de sinus is instelbaar. Dit signaal wordt gesuperponeerd op een constante en een random signaal. Het random signaal bestaat uit een normaal verdeelde ruis met een gemiddelde waarde van 0 en een standaardafwijking van 2. Om frequenties te voorkomen die in de praktijk niet voorkomen, wordt dit signaal nog door een laag doorlaat filter gestuurd. Het signaal TBUIT is dus de sommatie van een sinus, een constante en een random signaal.

Onder de straling IB wordt de kortgolvlige straling verstaan in het gebied van 300-3000 nm. Deze straling omvat het gebied van het zichtbare licht (400-700 nm), en komt overeen met de straling van een lichaam met een oppervlaktetemperatuur van ongeveer 6000 K. Een gedeelte van de straling wordt door de atmosfeer verstrooid (diffuse straling) en een gedeelte wordt direct doorgelaten (directe straling). De intensiteit van de straling is onder andere afhankelijk van het jaargetij, het tijdstip op de dag en de bewolgingsgraad. De stralingsintensiteit wordt gesimuleerd door de positieve helft van een sinusfunctie. Bij een globaal constante bewolgingsgraad is dit een redelijke benadering. Het maximum en het tijdstip van zon-opkomst/ondergang zijn vrij in te voeren. In de kas is de stralingsintensiteit geringer dan buiten en door lichtmetingen bepaald op 60 % van de buitenstraling IB. De hoeveelheid netto voelbare warmte (HFI) die aan de kaslucht wordt afgestaan is bij een lege kas 100 % van de totale straling binnen. Bij aanwezigheid van een gewas in de kas (Breuer J.J.G.,1987) is dit afhankelijk van de Leaf Area Index (LAI = bladdichtheid per teeltoppervlak). De parameters voor het buitenklimaat en de hoeveelheid straling binnen zijn vrij op te geven.

#### 4.4 Het simulatiemodel in PSI.

Het simulatiepakket PSI is een blok-georiënteerd interactief simulatieprogramma voor de bestudering van het dynamisch gedrag van continue en discrete systemen (Bosch P.P.J. van den, 1984). Ongeveer 50 verschillende blokken zijn beschikbaar, zowel lineaire als niet-lineaire blokken, maar ook logische functies. Daarom kan PSI worden gebruikt voor het oplossen van differentiaalvergelijkingen, differentie, logische of algebraïsche lineaire en niet lineaire vergelijkingen, of een combinatie hiervan.

Enige faciliteiten van PSI zijn:

- Ongeveer 50 krachtige blokken, waaronder verschillende typen integratoren, dode tijden, regelaars, sample & hold etc.
- Vijf numerieke integratiemethoden (Runga Kutta, Euler etc.).
- Optimalisatie-algoritme dat tot 8 parameters op hetzelfde moment volgens een te kiezen kostencriterium kan minimaliseren.
- Gebruikersvriendelijke output-mogelijkheden (numeriek, grafisch).
- Automatische test van de ingebrachte informatie (75 verschillende 'error-messages' beschikbaar).

De theoretische modellen die in vorige paragrafen zijn afgeleid worden nu geconverteerd naar PSI. Dit betekent dat buiten de reeds gedeclareerde variabelen en parameters, een groot aantal hulp-parameters gebruikt moeten worden. Door het grote aantal functies, variabelen en parameters die worden gebruikt in dit model is het niet zinvol hier verder op in te gaan. Volstaan wordt te vermelden dat het model is opgenomen in bijlage 1.



## 5. Validatie model aan de hand van systeemgedrag proces.

### 5.1 Systeem-metingen aan het proces.

De systeem-metingen aan het proces zijn van belang om de in het model theoretisch bepaalde parameters te valideren/optimaliseren aan de in de praktijk optredende waarden. Op het regelproces zijn stapvormige verstoringen aangebracht, in de vorm van het opensturen van de regelkleppen van de verwarmingssystemen. Door de metingen als herhalingsmetingen uit te voeren wordt een betrouwbare parameterschatting mogelijk. Van een reeks uitgevoerde metingen zijn de volgende metingen in dit rapport opgenomen:

DATUM	VERWARMINGSSYSTEEM	STURING KLEP	SCHERMSTAND	FIGUUR
251187	AW-NET	0 -> 100 %	GESLOTEN	5.1
271187	AW-NET	0 -> 100 %	GESLOTEN	5.2
021287	KW-NET	0 -> 100 %	GESLOTEN	5.3
031287	KW-NET	0 -> 100 %	GESLOTEN	5.4

TABEL 5.1

Belangrijke gemeten parameters van het regelproces zijn:

- TKASW : de gemeten luchttemperatuur in de kas
- TANV1 : de aanvoer-temperatuur van het AW-net
- TRET1 : de retour-temperatuur van het AW-net
- TANV2 : de aanvoer-temperatuur van het KW-net
- TRET2 : de retour-temperatuur van het KW-net

### 5.2 Parameterschatting door optimalisatie.

Voor de data-opslag van de systeem-metingen is gebruik gemaakt van de PDP-11/73 procescomputer. Het ontworpen simulatiemodel is op de centrale VAX-11/750 actief. Ten behoeve van de optimalisatie van de parameters van het model worden de meetdata van de systeem-metingen getransporteerd naar de Vax. Om de data binnen het simulatiepakket PSI te kunnen gebruiken, moet voor het creeren van de juiste structuur hierop een conversie plaatsvinden. Hiervoor is de benodigde software ontwikkeld.

De parameters van het model zijn in eerste instantie berekend aan de hand van fysische eigenschappen van materialen, waterzijdige metingen etc. Optimalisatie van de parameters vindt plaats met de in het simulatiepakket aanwezige optimalisatie-routine. Dit is een gereedschap dat door middel van het wijzigen van parameters, een in te geven 'kosten-functie' minimaliseert. Dit pakket PSI bevat een routine krachtig genoeg om gelijktijdig 8 parameters te wijzigen, en berust op de zogenaamde 'Heuvelklim-methode'. Elke parameter kan binnen een boven- en onderlimiet, dus met de begrenzingen binnen het regelproces, worden geoptimaliseerd. In het algemeen geldt dat op de ingang van het model hetzelfde ingangssignaal gezet wordt als in het fysische proces

het geval was. De uitgang van het model en van het systeem worden nu vergeleken. De te optimaliseren parameters van het model worden zodanig gewijzigd, dat de uitgangen gelijk of zo gelijk mogelijk zijn. In FIG. 5.5 wordt het parameterschatten door optimalisatie schematisch gegeven.

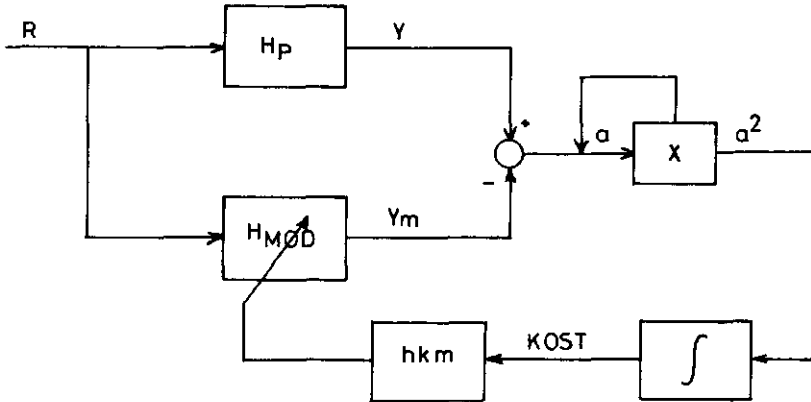


FIG. 5.5

Het verschil tussen de uitgang van het model  $H_M(t)$  en het systeem  $H(t)$  is een functie van de tijd. Voor de optimalisatie is een uitdrukking nodig, die de afwijking tussen de uitgangen over het simulatie-interval beschrijft. Als beide signalen over het interval gelijk zijn, is de afwijking, de 'kosten-functie' genoemd, gelijk aan nul. In de praktijk zal een waarde van nul moeilijk gehaald worden. Dit betekent dat de routine probeert door kleine parameterveranderingen een steeds lagere waarde voor de kosten-functie te verkrijgen. De uiteindelijk laagst bereikte waarde voor de kosten-functie is een maat voor de gemiddelde fout tussen de uitgang van het model en de uitgang van het systeem. De kosten-functie is een sommatie van een aantal foutsignalen (afwijkingen), en ziet er als volgt uit:

$$KOST = \int_0^T \{ (TANV - TANVW)^2 + (TRET - TRETW)^2 + 2 \cdot (TKAS - TKASW)^2 \} dt$$

Uit de functie KOST blijkt dat aan het overeenkomen van TKAS en TKASW de grootste waarde wordt toegekend, echter TANV en TRET dienen eveneens in de functie te worden opgenomen. Zou dit niet het geval zijn, dan zou de gemodelleerde  $T_{kas}$  overeen kunnen komen met de werkelijke waarde  $TKASW$ , zonder dat de gemodelleerde TANV en TRET ook maar enigszins te vergelijken zijn met de werkelijk optredende waarden. De kosten-functie wordt ingebouwd in het simulatie-model samen met de te optimaliseren parameters.

De optimalisatie van de parameters van het model, behalve die van het KW-net, heeft plaats gevonden aan de hand van meetnacht 251187. Voor de parameters van het model voor het KW-net is meetnacht 021287 gebruikt. Voor alle meetnachten geldt dat het model wordt belast met

de werkelijk gemeten buitentemperatuur. Hierbij wordt op hetzelfde tijdstip als bij het werkelijke proces een stapvormige verstoring aangebracht op de sturing van de mengklep van het bijbehorende verwarmingsnet. Dit houdt in dat de uitgang van het model TKAS zo goed mogelijk de werkelijke waarde TKASW moet volgen, bij eveneens zo nauwkeurig mogelijke TANV en TRET van de verwarmingsnetten. Als startwaarden voor de parameters worden de theoretisch berekende waarden gebruikt. Door de te optimaliseren parameters vrij nauwkeurige grenzen op te leggen, wordt geen afbreuk gedaan aan de fysische interpreteerbaarheid hiervan. Met de gevonden parameters is daarna het model geevalueerd aan de overige meetnachten opgenomen in tabel 5.1. Ter bepaling van de kosten-functie zijn de volgende parameters van het werkelijke proces in het model opgenomen:

TBUIIT : de optredende buitentemperatuur  
 TKASW : de gemeten luchttemperatuur in de kas  
 TANVW : de gemeten aanvoertemperatuur van het betreffende verwarmingssysteem  
 TRETW : idem de retourtemperatuur.

In FIG. 5.1 t/m FIG. 5.4 zijn de waarnemingen in verschillende meetnachten opgenomen. De figuren geven eerst de na de optimalisatie gesimuleerde TKAS, met in dezelfde grafiek de werkelijke waarde TKASW. De tweede grafiek in de figuur geeft nogmaals TKAS, de variatie in de klepstand van 0 naar 100 % en de gesimuleerde TANV en TRET van het bijbehorende net. Met betrekking tot FIG 5.1 geldt dat TKAS de werkelijke waarde TKASW uitstekend volgt, zowel statisch (afwijking 0.07 K) als dynamisch. Het simulatie-interval in deze nacht bedraagt 13.8 uur. Aan het verloop van TANV1 is duidelijk het gedrag van een menginjectie-systeem te herkennen. In eerste instantie neemt TANV1 snel toe, echter na de de omlooptijd van het verwarmingssysteem is de toename afhankelijk van de stijging van TRET1. Indien in de praktijk de aanvoertemperatuur van de alternatieve warmtebron lager is dan de in dit onderzoek gestelde 80 oC, zal er dus minder water gerecirculeerd hoeven te worden om een TANV1 van 64 oC te bereiken. Dit heeft dan een gunstige uitwerking op het regelgedrag van het bijbehorende verwarmingsnet. Het gedrag van TANV1 en TRET1 en daardoor ook het geleverde vermogen komen goed overeen met de gemeten grootheden.

Met de geoptimaliseerde parameters voor meetnacht 251187, is nu met gelijkblijvende parameters het model belast met de buitentemperatuur van meetnacht 271187. Ook hier, FIG. 5.2 gelden soortgelijke conclusies als in meetnacht 251187. Dit betekent dat het model voor het AW-net en het model voor TKAS voldoende nauwkeurig overeenkomen met het werkelijke proces. Meetnacht 021287 in FIG. 5.3 laat de responsie op de aansturing van het KW-net zien. De simulatie-interval bedraagt in deze grafiek 8 uur. Hieruit blijkt dat TKASW sneller reageert dan de gemodelleerde TKAS. Het dynamisch gedrag van TKAS vertoont echter een soortgelijk karakter als dat van TKASW. Statisch komt het model goed overeen met de gemeten waarde (0.25 K). In de tweede grafiek van FIG. 5.3 is duidelijk te zien dat TANV2M zeer langzaam reageert op een stapvormige aansturing van de mengklep. De oorzaak hiervan is toe te schrijven aan de grote hoeveelheid recirculerend retourwater, nodig om TANV2 te reduceren van 90 oC (TKETEL) tot 68 oC. Een reductie van de aanvoertemperatuur van de ketelwarmtebron zou het regelgedrag van het KW-net sterk verbeteren. Opgemerkt dient nog te worden dat het verschil TANV2M - TRET2 van het model een graad lager is dan in de praktijk het geval is. De gemiddelde buistemperatuur en het geleverde vermogen van dit verwarmingssysteem komen echter wel overeen met de gemeten waarden. Uit FIG. 5.4 (031287) blijkt ook hier een voldoende

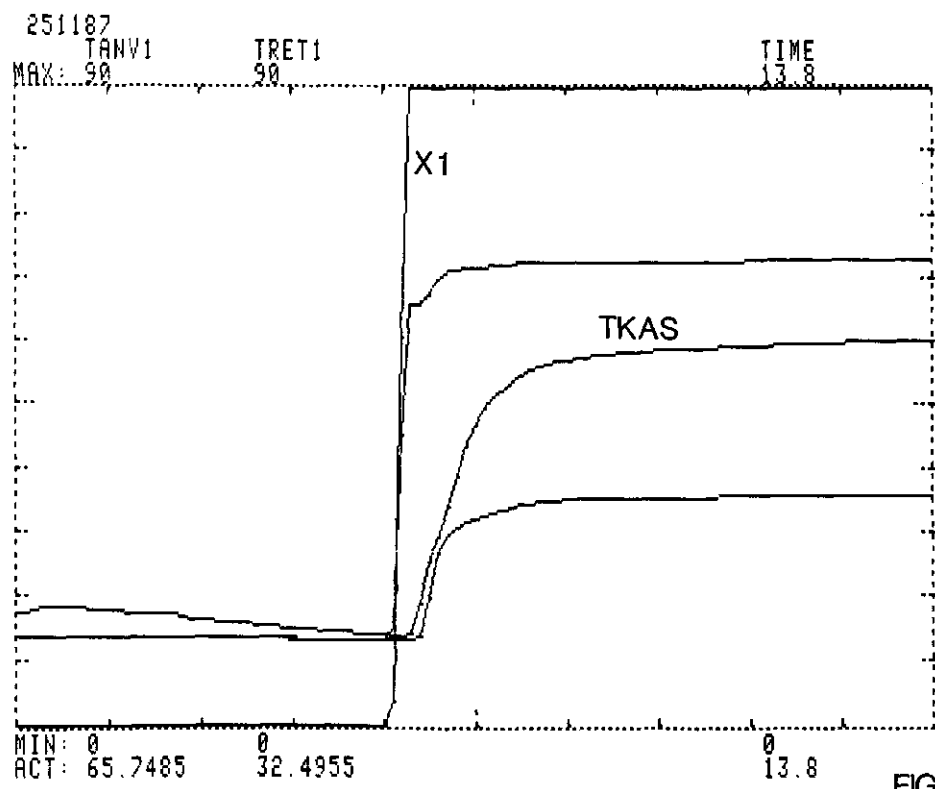
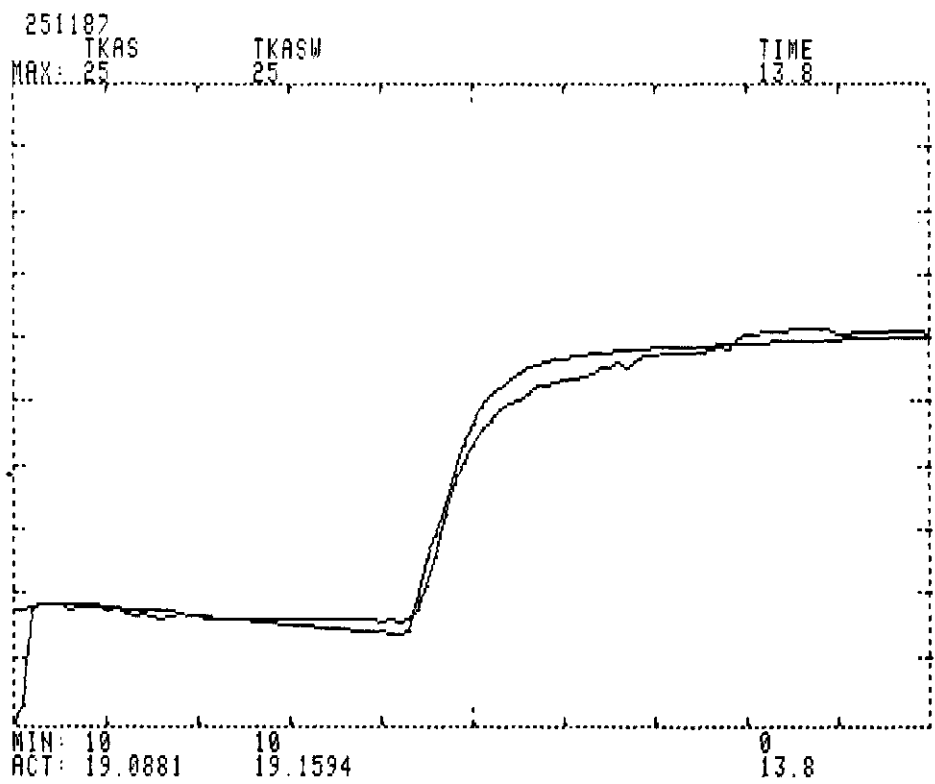


FIG. 5.1

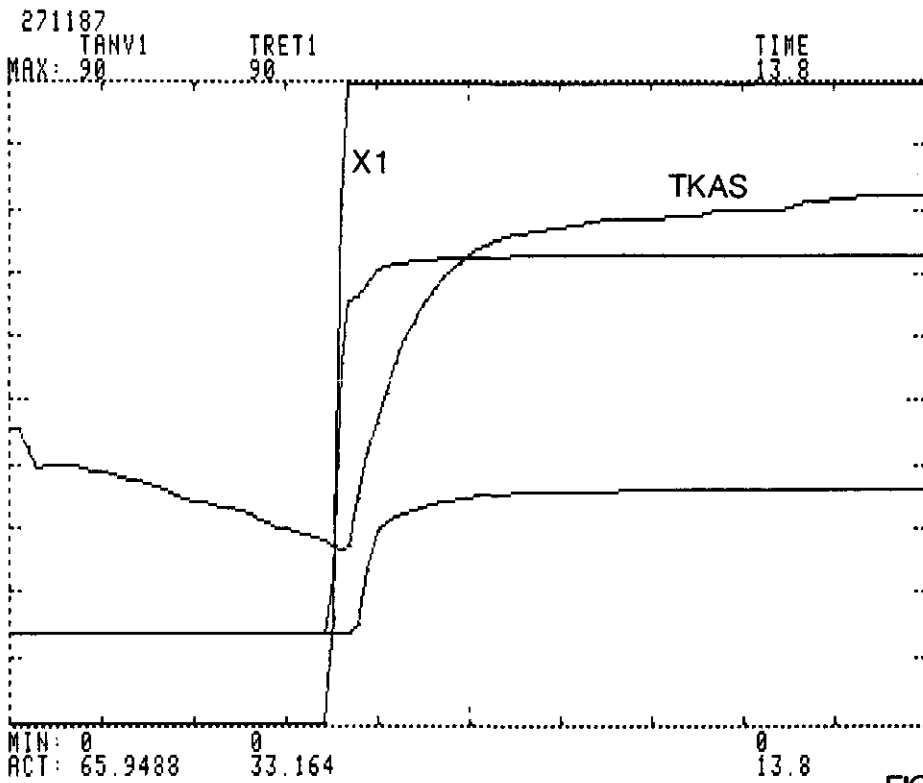
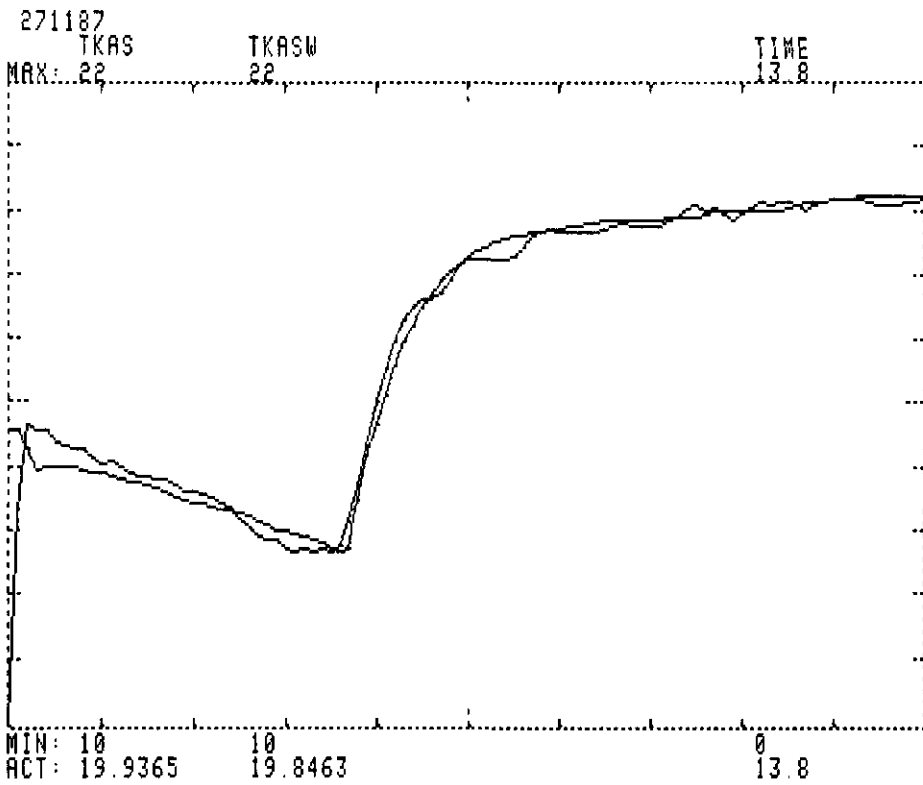


FIG. 5.2

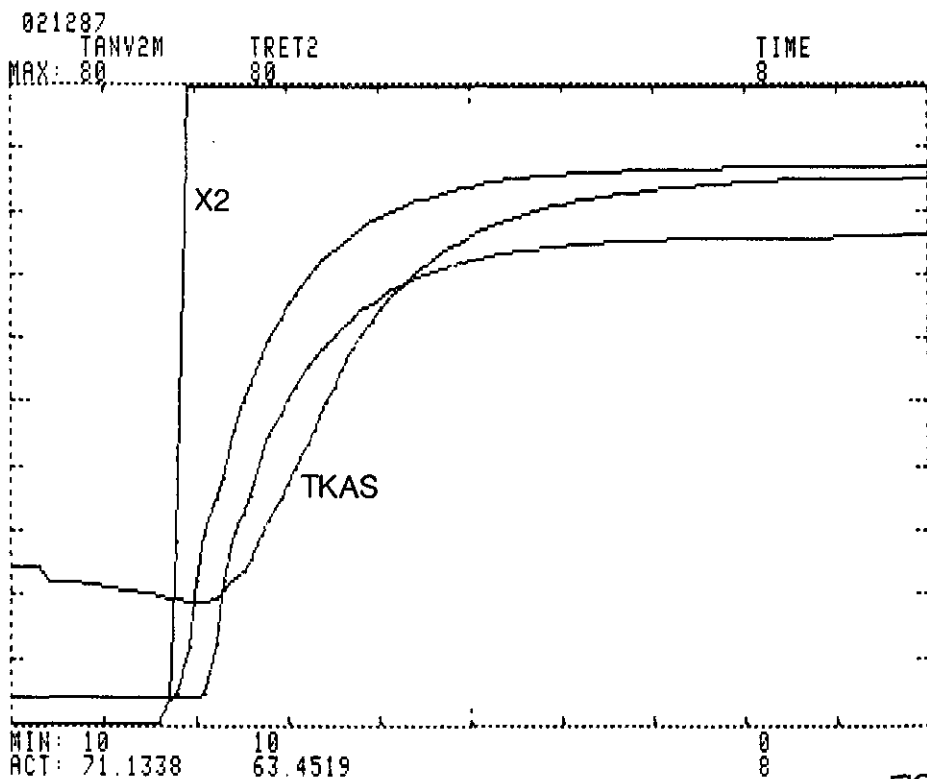
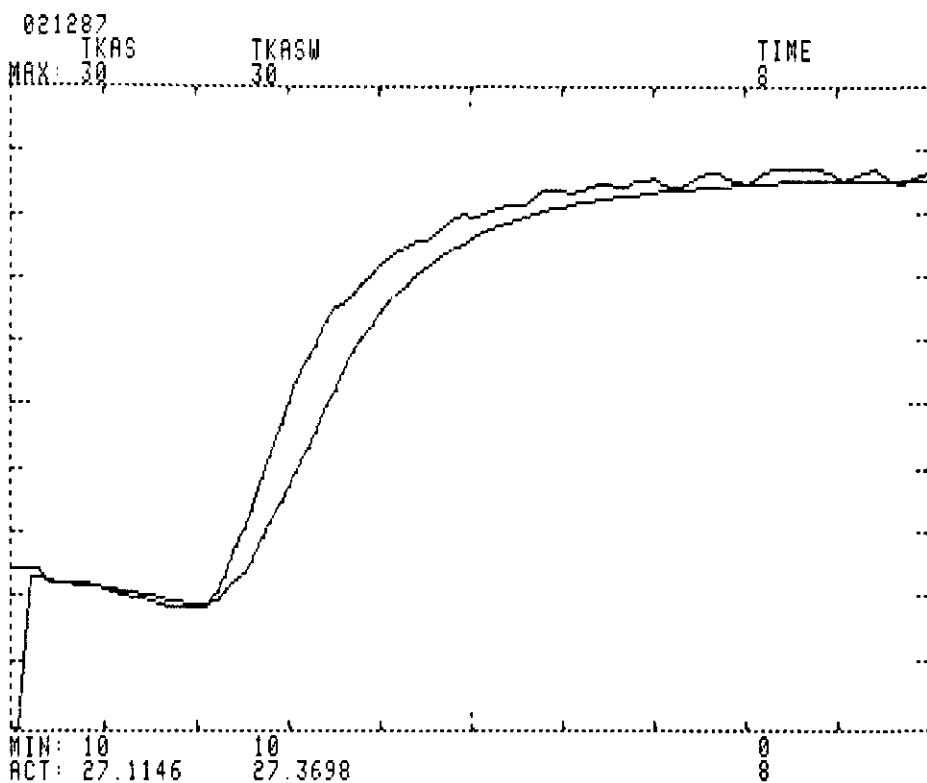


FIG. 5.3

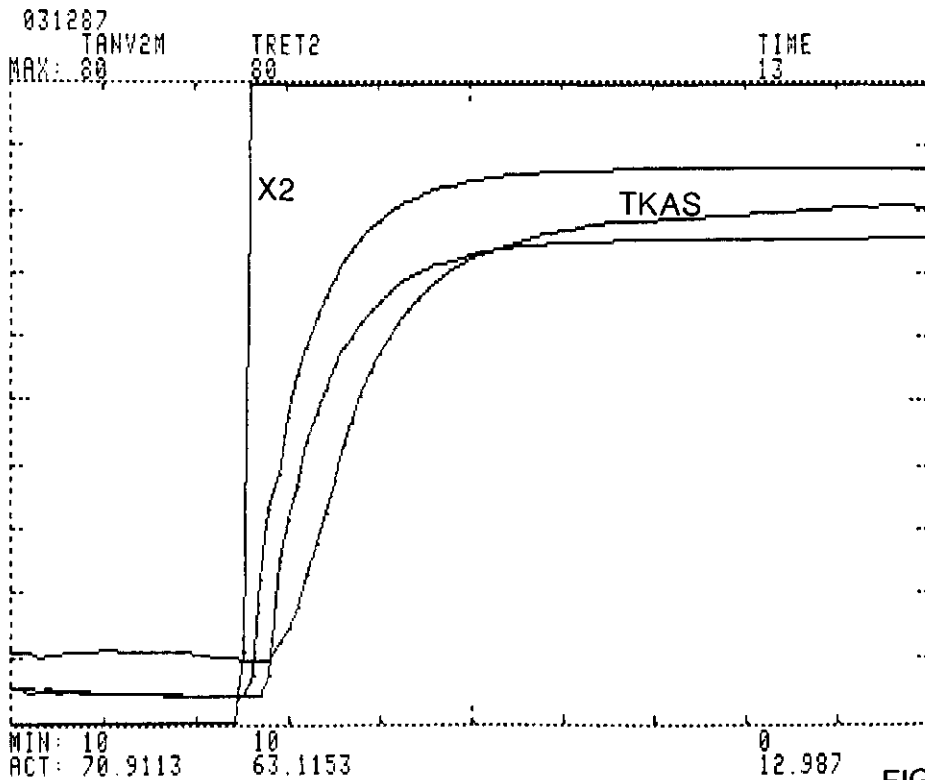
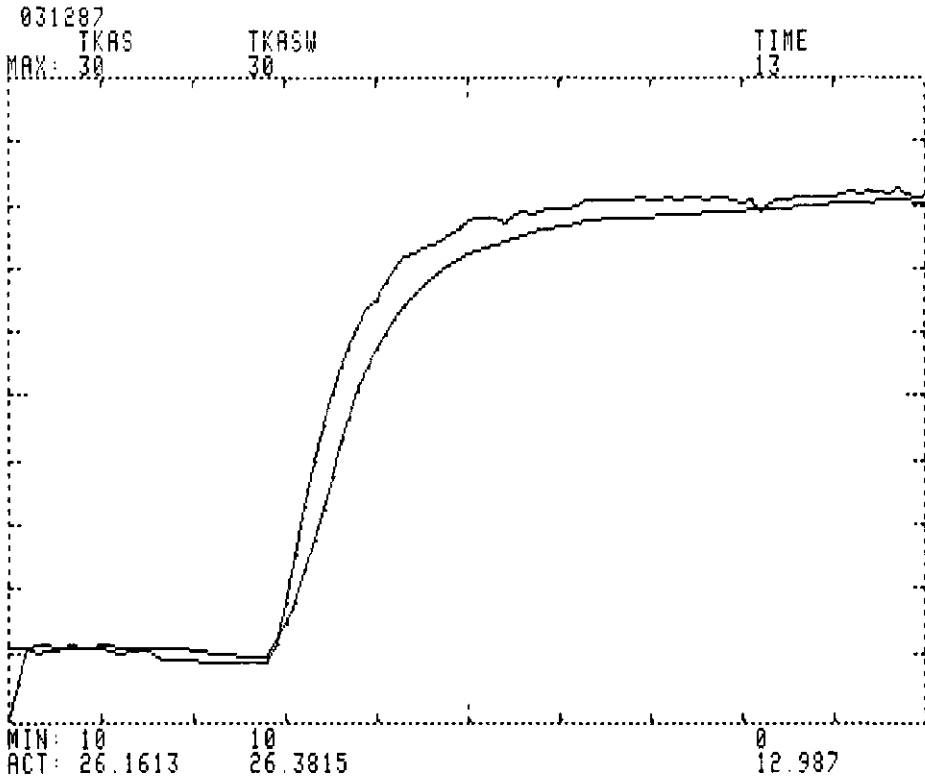


FIG. 5.4

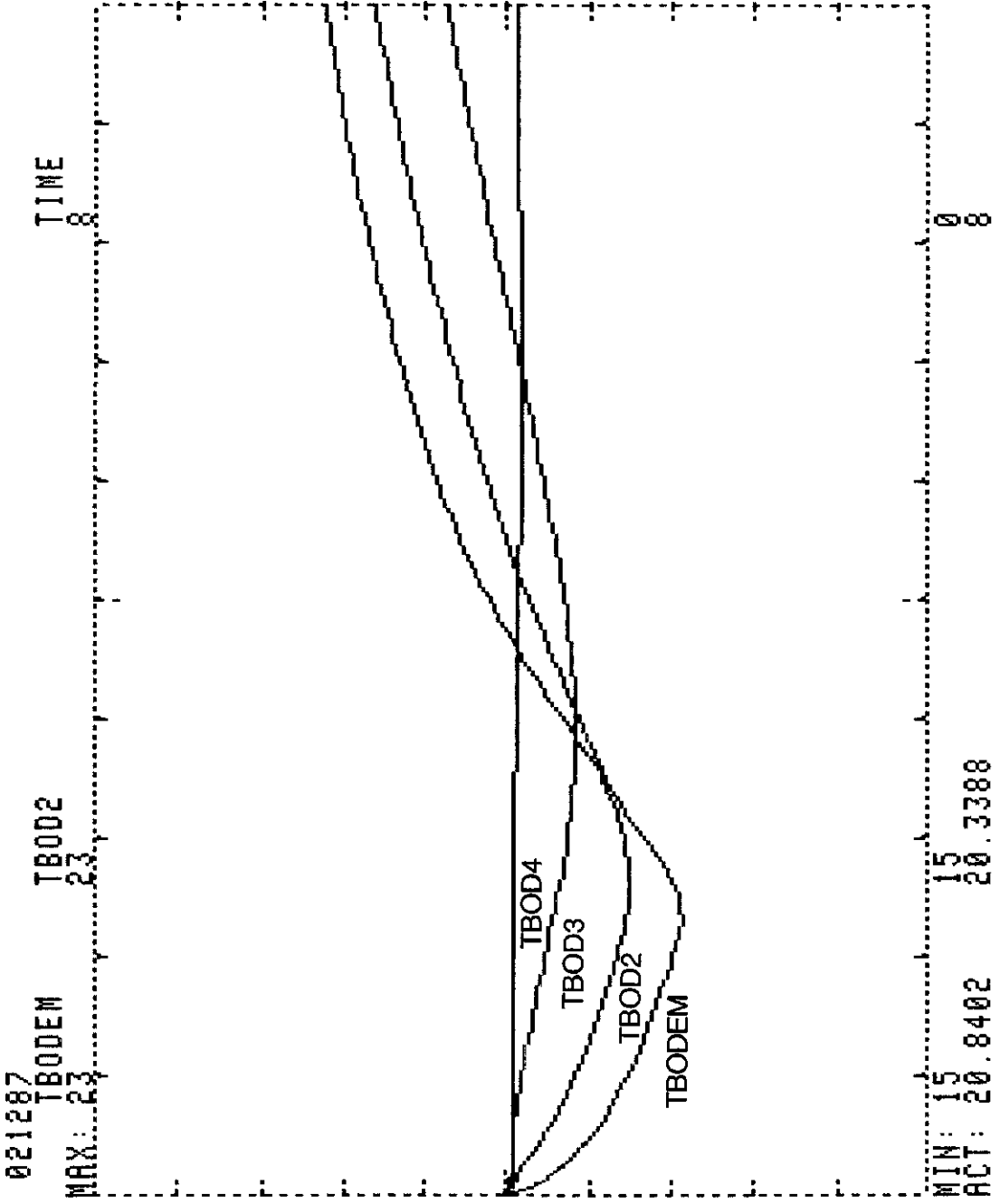


FIG. 5.6



nauwkeurige benadering van de werkelijke grootheden die in het proces optreden. Het simulatie-interval in deze nacht bedraagt 13 uur. In FIG. 5.6 is het verloop van de gesimuleerde bodemtemperaturen weergegeven (meetnacht 021287). TBODEM is de temperatuur van de oppervlakte-laag van 1 cm dikte, TBOD2, TBOD3 en TBOD4 die van de lagen hier beneden. Hierin is duidelijk de stapvormige verstoring in de warmtelevering van het KW-net te herkennen. De mate van variatie van een bodemtemperatuur is afhankelijk van dikte en diepte.

## 6. Ontwerp van het digitale regelalgorithme.

Bij een directe digitale regeling (DDC) wordt de computer eveneens in de regellus opgenomen (Verwaayen, 1987). De regelacties worden in de vorm van regelalgorithmen in de procescomputer opgeslagen. Deze digitale (discrete) regelalgorithmen vervangen de analoge regelaars die voor de introductie van de computer gebruikelijk waren. Dit betekent dat bij de realisatie van een regelaar een differentiaal-vergelijking overgaat in een differentie-vergelijking. Indien het theorema van Shannon (Verwaayen P.W.T., 1987) voldoet, kan worden geschreven:

$$\frac{df}{dt} \rightarrow \frac{f(nT) - f(nT-T)}{T} \quad 6.1.1$$

Hierin is T de sample-tijd van het regelproces. In de procescomputer is op de sample-tijden het werkelijke signaal beschikbaar. In principe bestaan er twee soorten regelalgorithmen, positie- en snelheids-algorithmen. Welke soort wordt toegepast hangt af van de overdrachtsfunctie van het regelproces. In het algemeen wordt het positie-algorithme toegepast indien het regelorgaan (de mengklep) geen houdwerking bezit (geen integrerende werking). Is dit wel het geval, dan verdient het snelheids-algorithme, waarbij de uitgang van de regelaar een maat is voor de verstelling van het regelorgaan, de voorkeur. In de toegepaste hardware configuratie ziet de regelsituatie er schematisch als volgt uit:

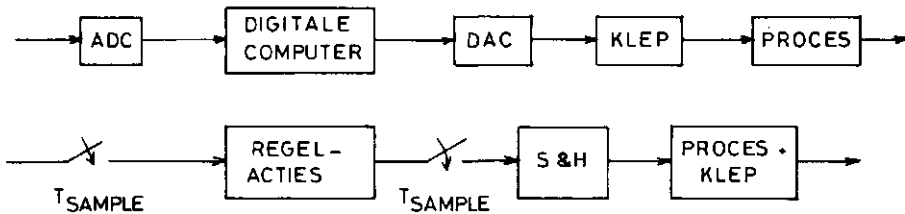


FIG. 6.1

Doordat het digitale signaal door de kasmicroprocessor wordt omgezet in een tijdsafhankelijk analogoog signaal (DAC), kan dit proces worden opgevat in een Sample & Hold (S&H) schakeling. De integrator aanwezig in de overdrachtsfunctie van de regelkleppen, wordt nu als onderdeel van de overdrachtsfunctie van het proces gezien. Dit levert de voorwaarden voor het toepassen van het positie-algorithme. Volgens dit algorithme (conventionele type) geldt:

$$\begin{aligned}
 Y_p(nT) &= K_p \cdot e(nT) && \text{Proportionele deel (P)} && 6.1.2 \\
 Y_i(nT) &= Y_i(nT-T) + K_i \cdot e(nT) && \text{Integratie deel (I)} && \\
 Y_{pi}(nT) &= Y_p(nT) + Y_i(nT) && \text{PI-actie} && \\
 Y_{pi}(nT) &= K_p \cdot e(nT) + \{Y_i(nT-T) + K_i \cdot e(nT)\} && && 6.1.3
 \end{aligned}$$

Indien de proportionaliteitsfactor van dit algorithmme  $K_p$  wordt vergeleken met de factor voor een continue regelaar  $K_r$ , dan geldt dat deze gelijk is. Voor de integratie-constante  $K_i$  van de discrete regelaar geldt ten opzichte van de integratie-constante  $t_i$  van de continue regelaar de relatie:

$$K_i = \frac{K_r \cdot T_s}{t_i}, \text{ waarbij } T_s = \text{Sample-tijd regelproces}$$

Indien zich verzadigingen in de regelingen voordoen, kan het integratie-deel  $Y_i(nT)$  aangroeien tot fysisch niet meer te realiseren waarden (windup) en moet daarom worden begrensd in een anti-windup algorithmme. Buiten deze absolute begrenzingen van de uitgang van het integratie-algorithmme  $Y_i(nT)$  zijn ook relatieve grenzen noodzakelijk. Dit betekent dat in een bepaalde dynamische overgang  $Y_i(nT)$  wordt begrensd. Indien het foutsignaal  $EPSIL1 = SPKL - TKASL < 0$ , dan wordt  $Y_i(nT)$  begrensd door de momentane aanvoertemperatuur  $TANV$ , verminderd met een vaste delta  $T$  van  $DL$  oC. Is  $EPSIL1 > 0$ , dan geldt voor  $Y_i(nT) < TANV + DL$ . Dit regelalgorithme waarbij de uitgang van de integrator wordt gelinkt aan  $TANV$  en een bepaalde delta  $T$ , wordt het "Dog-Lead" algorithmme genoemd (Udink ten Cate A.J., 1983). Voor het onderdrukken van nadelige effecten bij optredende situaties ten gevolge van niet-lineariteiten (vezadigingen) in het regelproces, is het echter gewenst het positie-algorithmme in een andere vorm te gebruiken, het zogenaamde Modified-algorithmme (Udink ten Cate A.J., 1983). Volgens formule 6.1.3 geldt:

$$\begin{aligned}
 Y_{pi}(nT) &= K_p \cdot e(nT) + Y_i(nT-T) + K_i \cdot e(nT) \\
 &= Y_p(nT) + Y_{pi}(nT-T) - Y_p(nT-T) + K_i \cdot e(nT) \\
 Y_{pi}(nT) &= Y_{pi}(nT-T) + K_p \{ e(nT) - e(nT-T) \} + K_i \cdot e(nT) && 6.1.4
 \end{aligned}$$

Hiervoor geldt dat ten behoeve van de anti-windup en de relatieve begrenzingen van de uitgang van het integratie-algorithmme, alleen de uitgang  $Y_{pi}(nT-T)$  begrensd hoeft te worden. In het lineaire gebied reageert dit algorithmme op overeenkomstige wijze als het conventionele type.

De regelconfiguratie voor het regelen van de luchttemperatuur in de kas is weergegeven in FIG. 6.2

## REGLCONFIGURATIE

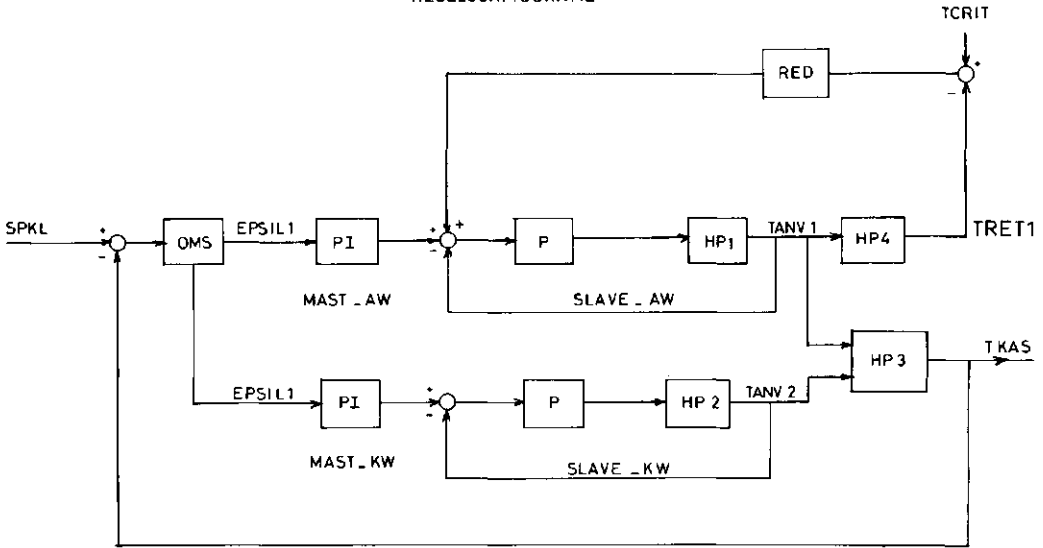


FIG. 6.2

Hierin is:

- OMS : de symbolische weergave van alle conditionele statements en initialisaties in het algoritme
- MAST-AW : de Master-regelaar voor het gebruik van het AW-net
- MAST-KW : de Master-regelaar voor het gebruik van het KW-net
- SLAVE-AW: de Slave-regelaar voor de regeling van TANV1
- SLAVE-KW: de Slave-regelaar voor de regeling van TANV2
- RED : de symbolische weergave van de aanwezige reductie-algorithmen
- SPKL : setpoint voor de luchttemperatuur in de kas.

Zoals in FIG. 6.2 is te zien, bestaat de regelconfiguratie uit een meervoudige Master/Slave regeling (cascade-regeling) gecombineerd met een reductie-algorithme RED. De Master-regelaar AW/KW (PI-actie) regelt de gewenste luchttemperatuur (SPKL) in de kas, de Slave-regelaars (P-actie) de betreffende TANV1/2 van het verwarmingssysteem. De benodigde initialisaties voor het starten en schakelen zijn verdisconteerd in het blok 'OMS'. Het reduceren van alternatieve warmte ten behoeve van de maximaal toelaatbare retourtemperatuur TCRIT, evenals het gelijker tijd verhogen van de geleverde warmte door het KW-net, zijn opgenomen in het blok 'RED'. HP1 t/m HP4 zijn overdrachtsfuncties, die de relaties weergeven tussen de uitgang en ingang van het bijbehorende blok.

Voor de beoordeling van respectievelijk het conventionele-algorithme ten opzichte van het modified-algorithme, zijn in FIG. 6.3 en FIG. 6.4 simulaties gemaakt van het totale regelproces. Elke Slave-regelaar is uitgevoerd met een proportionele regelactie (positie-

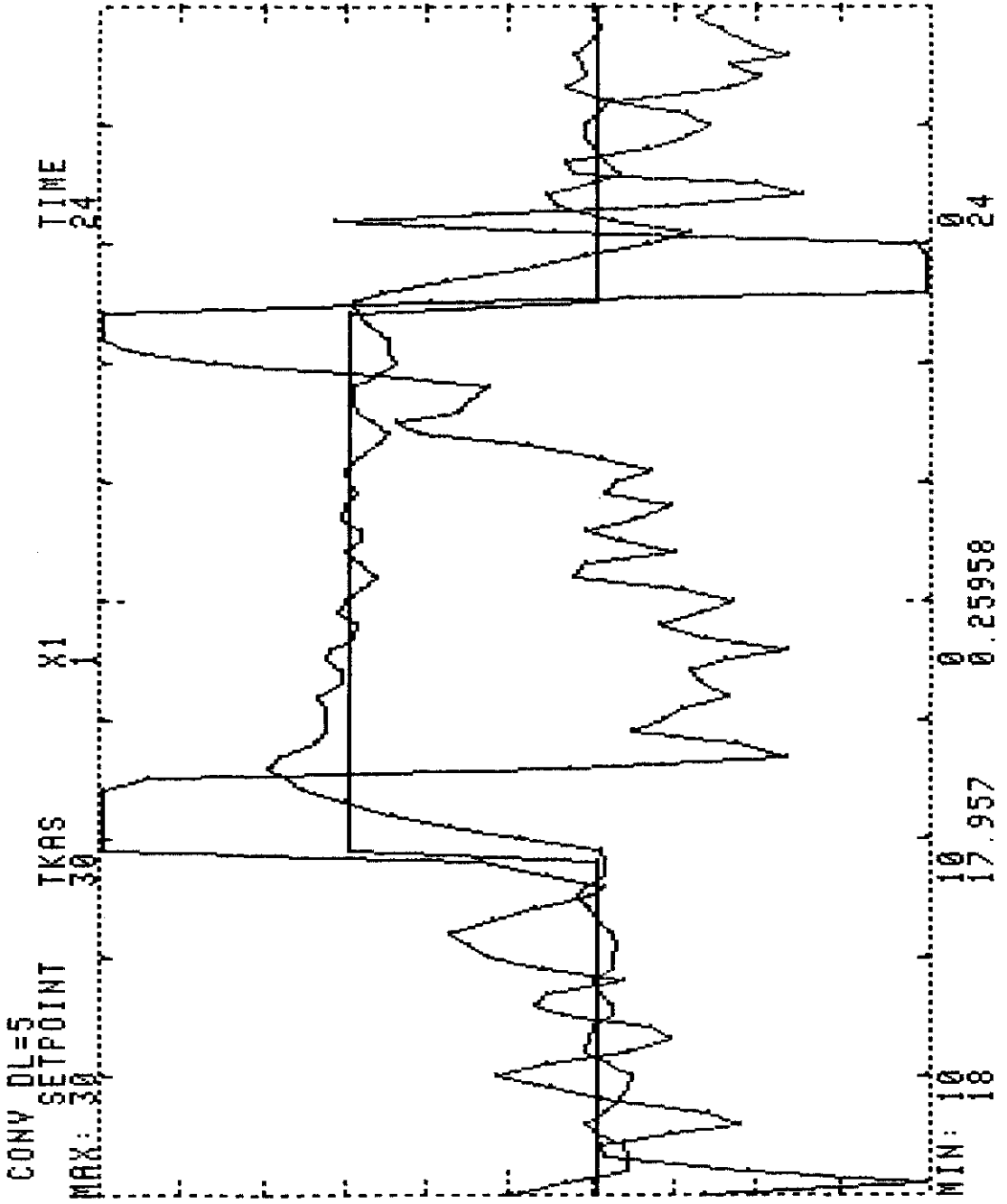


FIG. 6.3

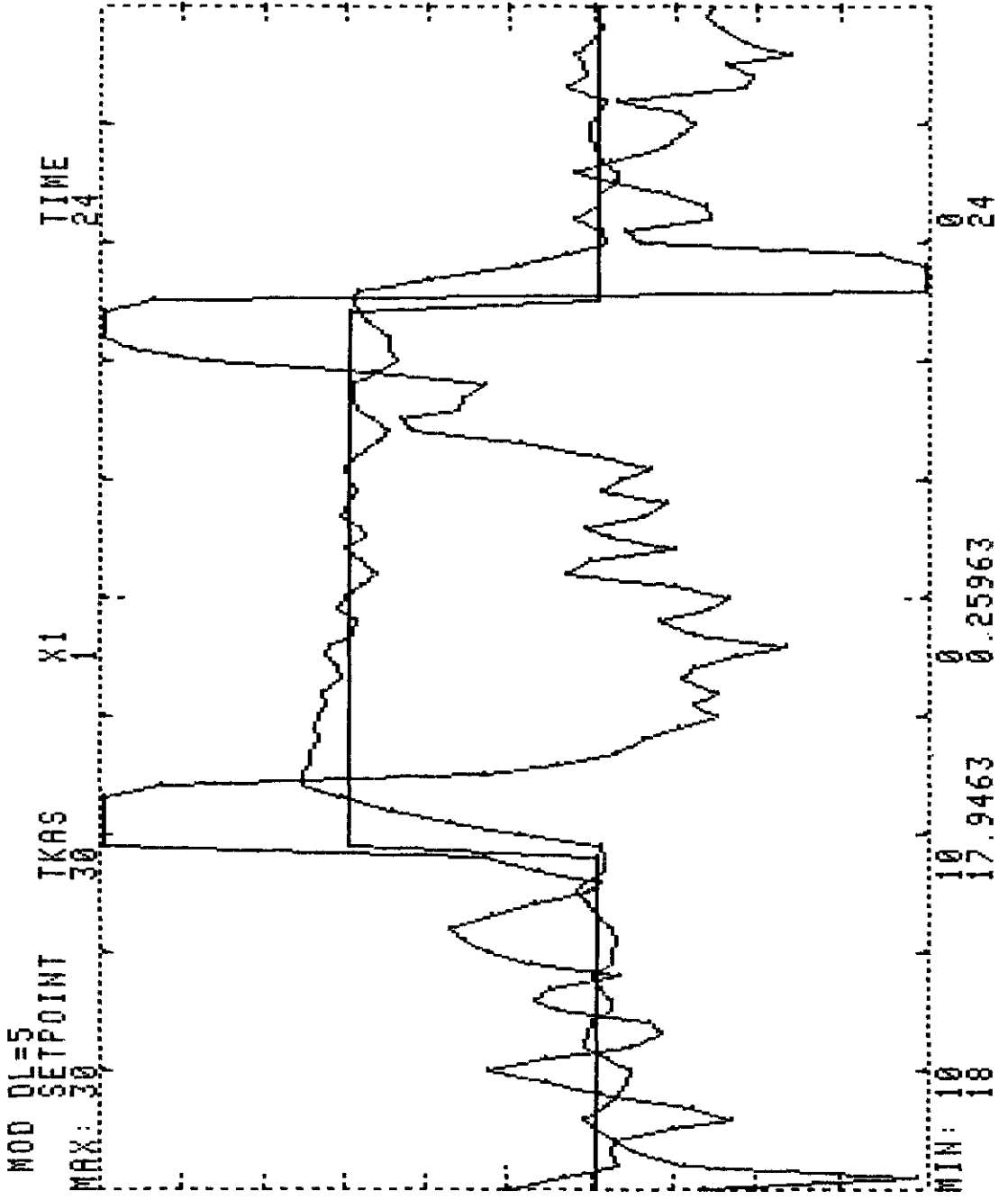


FIG. 6.4

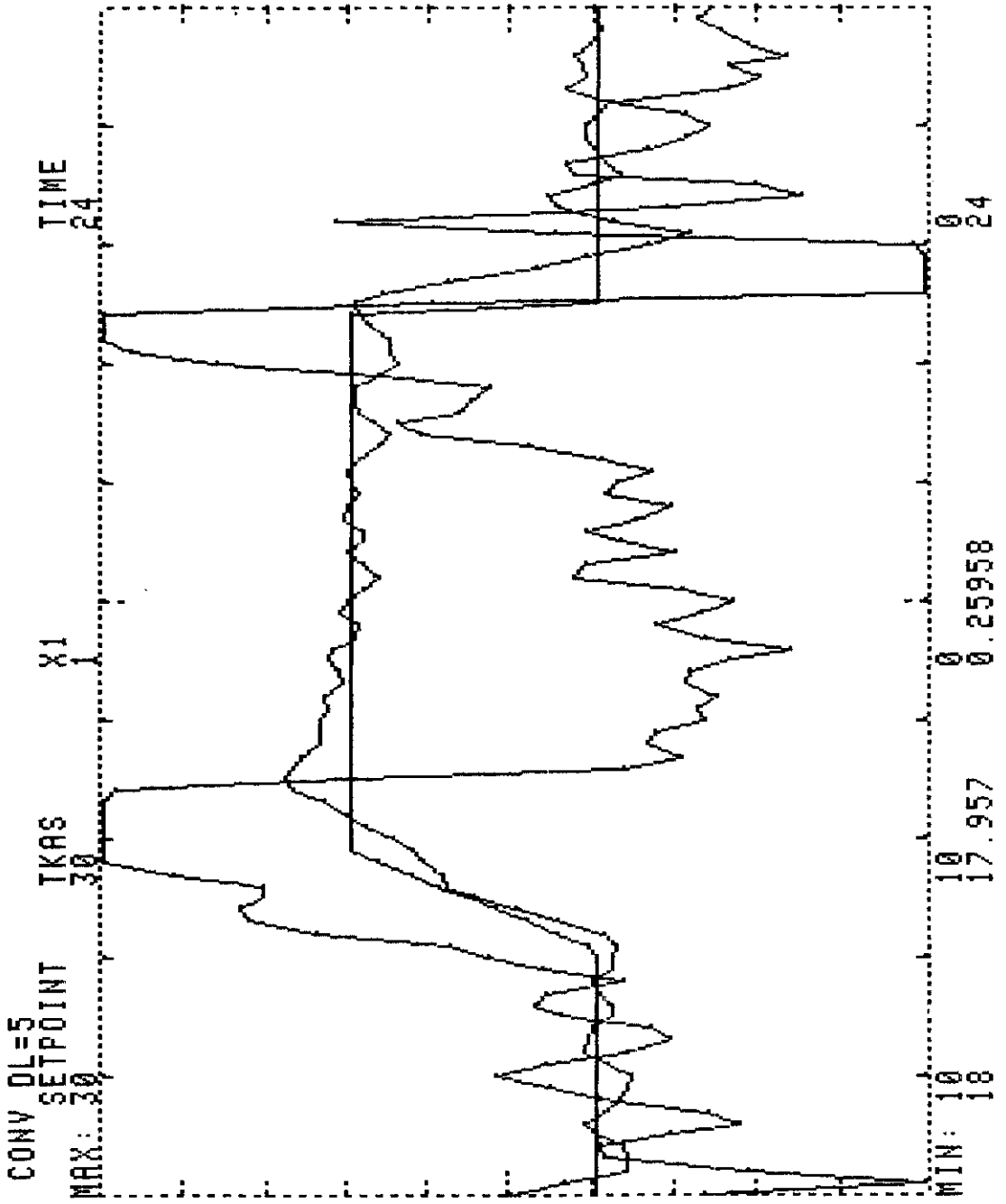


FIG. 6.5

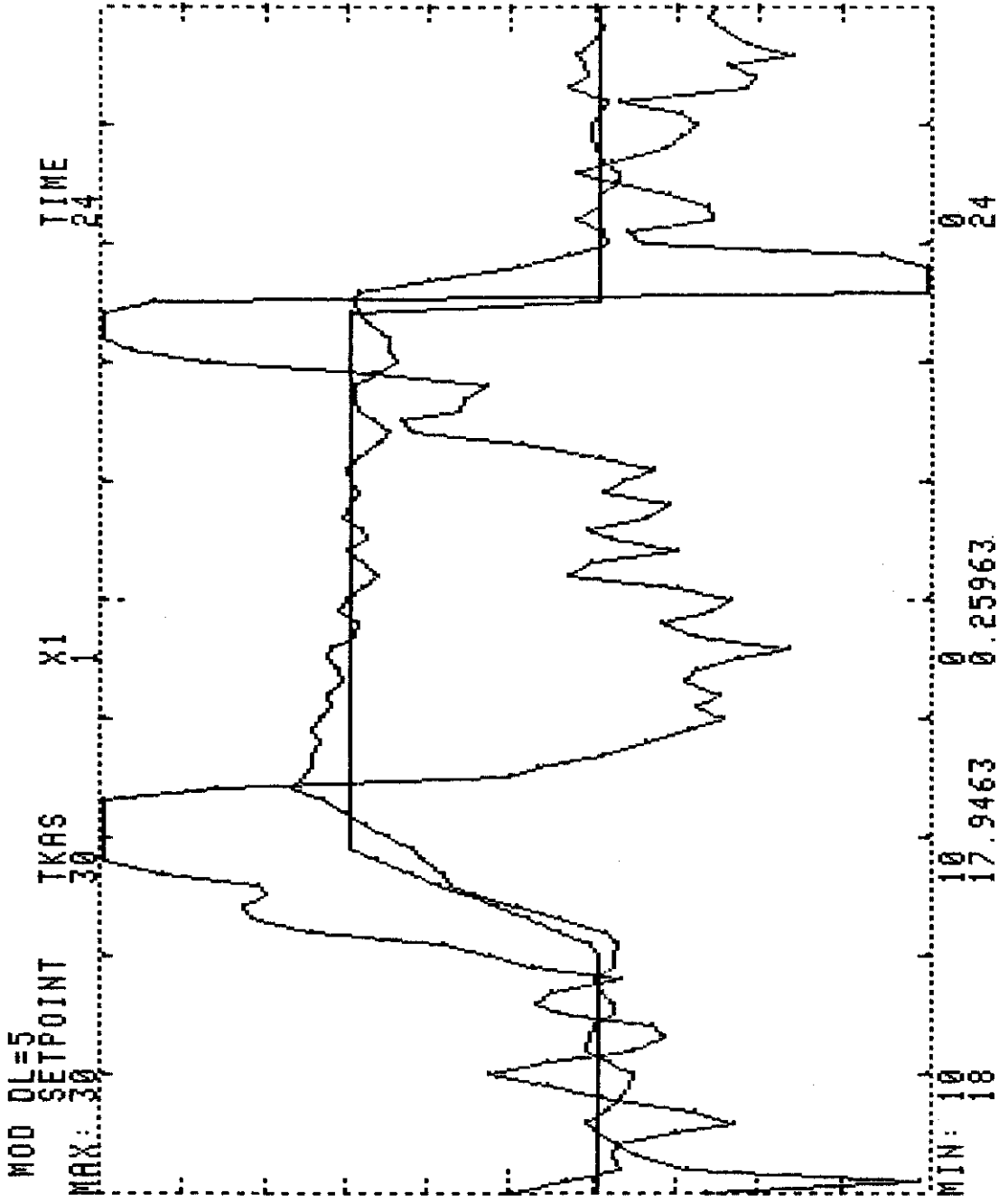


FIG. 6.6



algorithmen), dat zorg draagt voor de gewenste aanvoertemperatuur van het bijbehorende verwarmingssysteem. De relatieve temperatuur-grenzen DL zijn bij de weergegeven simulaties ingesteld op 5 oC. Bij de setpoint-overgang SPKL van 18 oC naar 24 oC treedt bij het modified-algorithme de regelklep eerder uit de verzadiging dan bij het conventionele-algorithme. Dit leidt tot een geringere overshoot in de responsie. Indien de regelklep in het lineaire gebied werkt, is te zien dat beide typen algorithmen overeenkomstig reageren. Bij een setpoint-verlaging SPKL van 24 oC naar 18 oC komen de nadelige effecten van het conventionele-algorithme nog beter naar voren. De stapvormige verstoring van de ingestelde waarde resulteert voor dit type in een grote undershoot in de gerealiseerde TKAS. Bij het modified type FIG. 6.4 is deze undershoot minimaal. In FIG. 6.5 en FIG. 6.6 is nogmaals een zelfde vergelijking gemaakt, maar nu met een meer realistisch verloop van de luchttemperatuur in de kas van nacht-naar dagsetpoint. Ook hier is te zien dat het modified-algorithme voordelen biedt ten opzichte van het conventionele-algorithme, vooral bij de dag/nacht overgang. Gezien de grote voordelen van het modified-algorithme, betekent dit dat in het verdere verloop van het onderzoek hiermee wordt gewerkt. De Slave-regelaars SLAVE-AW en SLAVE-KW zijn uitgevoerd overeenkomstig formule 6.1.2.

De flowchart van het totale regelalgorithme valt uiteen in FIG. 6.8 t/m 6.10.

In FIG. 6.8 wordt allereerst het setpoint voor de luchttemperatuur voor de kas SPKL bepaald. In het simulatiemodel is het mogelijk om een praktisch-overeenkomstig setpoint te genereren. Het verloop en de instelmogelijkheden zijn weergegeven in FIG 6.7.

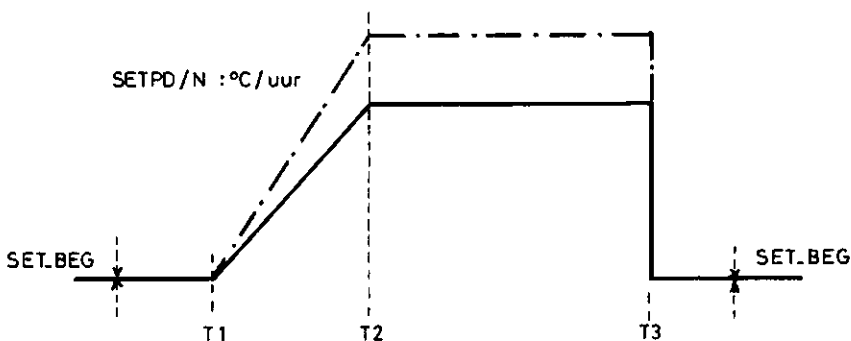


FIG. 6.7

De in te stellen parameters zijn:

T1 : tijdstip van nacht/dag overgang (begin opstoken)

T2 : tijdstip waarop het dagsetpoint is bereikt  
 T3 : tijdstip van dag/nacht overgang  
 SETPD/N : stijging van het setpoint in oC/uur tussen T1 en T2  
 SET-BEG : setpoint voor de nachttemperatuur

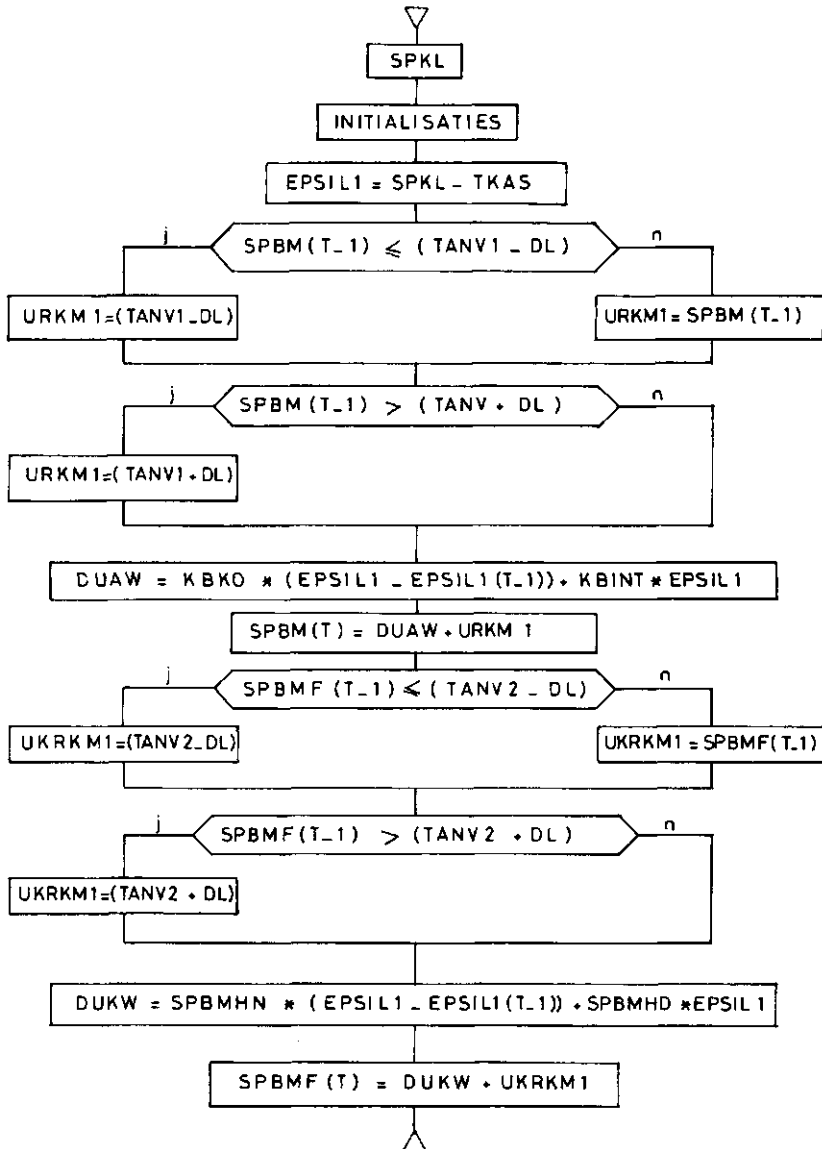


FIG. 6.8

In FIG. 6.8 zijn de volgende parameters van belang:

SPBM : het uitgangssignaal van de MAST-AW  
 SPBMF : het uitgangssignaal van de MAST-KW  
 SPBM1F : het uiteindelijke setpoint voor de aanvoertemperatuur TANV1  
 SPBS2F : idem voor de aanvoertemperatuur TANV2  
 EPSIL1 : foutsignaal SPKL - TKAS  
 DL : dog-lead waarde  
 KBKO : proportionaliteitsfactor van de MAST-AW  
 KBINT : integratieconstante van de MAST-AW  
 SPBMHN : proportionaliteitsfactor van de MAST-KW  
 SPBMHD : integratieconstante van de MAST-KW

Andere gebruikte parameters zijn hulpvariabelen, en daarom voor de beschrijving van het algoritme niet van belang. Met de parameter X(T) wordt de waarde van X op het tijdstip (T) bedoeld (huidige sample), met X(T-1) de waarde van de vorige sample. Aan de hand van FIG. 6.8 zal de werking van dit gedeelte worden beschreven.

Nadat het setpoint SPKL is bepaald, worden een aantal initialisaties verricht. Wanneer namelijk het regel-algoritme voor de eerste keer wordt doorlopen (het moment van opstarten) is de waarde van de parameters op het tijdstip (T-1) waarde niet bekend. Om inschakelverschijnselen te voorkomen, wordt hieraan een beginwaarde toegekend. Vervolgens wordt het foutsignaal EPSIL1 = SPKL - TKAS berekend. Dit foutsignaal is het ingangssignaal voor de MAST-AW. Hierin wordt eerst bepaald of het vorige uitgangssignaal SPBM(T-1) binnen de relatieve temperatuurgrenzen (dog-lead) valt, waarna het zo nodig wordt bijgesteld. Nu kan het nieuwe uitgangssignaal SPBM(T) worden bepaald volgens formule 6.5 (modified-algorithme). Voor de MAST-KW die hierna wordt berekend, geldt een soortgelijke bepaling. Het nieuwe uitgangssignaal voor deze regelaar is de parameter SPBMF(T). Het reductie-algoritme RED (FIG. 6.2) valt uiteen in een basisvergelijking en een aantal conditionele statements. Indien er een overschrijding van de maximale retourtemperatuur van het AW-net (TRET1 > TCRIT) plaatsvindt, wordt dit net gereduceerd volgens:

$$SREDUT = SPBM1F(T-1) - KBALG*(TRET1 - TCRIT) \quad 6.1.5$$

In woorden betekent dit dat het nieuwe setpoint voor TANV1 wordt gevormd door het vorige signaal SPBM1F(T-1) te verlagen met een factor KBALG maal de daadwerkelijke overschrijding. Dit komt overeen met een zuivere integrerende actie. Was de MAST-KW nog niet in werking, dan neemt dit algoritme de regeling van de luchttemperatuur in de kas (TKAS) over, omdat het AW-net wordt geregeld door het reductie-algoritme RED. Indien, door het reduceren van de geleverde warmte van het AW-net, na een bepaalde tijd TRET1 < TCRIT, dan zal er weer meer AW-warmte geleverd mogen worden. Dit houdt in dat de bijdrage KBALG\*(TRET1 - TCRIT) nu negatief wordt. Hierdoor wordt SREDUT groter, waardoor de levering van alternatieve warmte weer verder toeneemt. Het reductie-algoritme RED in combinatie met het blok OMS (zie FIG. 6.2) is als flowchart weergegeven in FIG. 6.9. Aan de hand van de in deze flowchart voorkomende conditionele statements zal de werking worden beschreven.

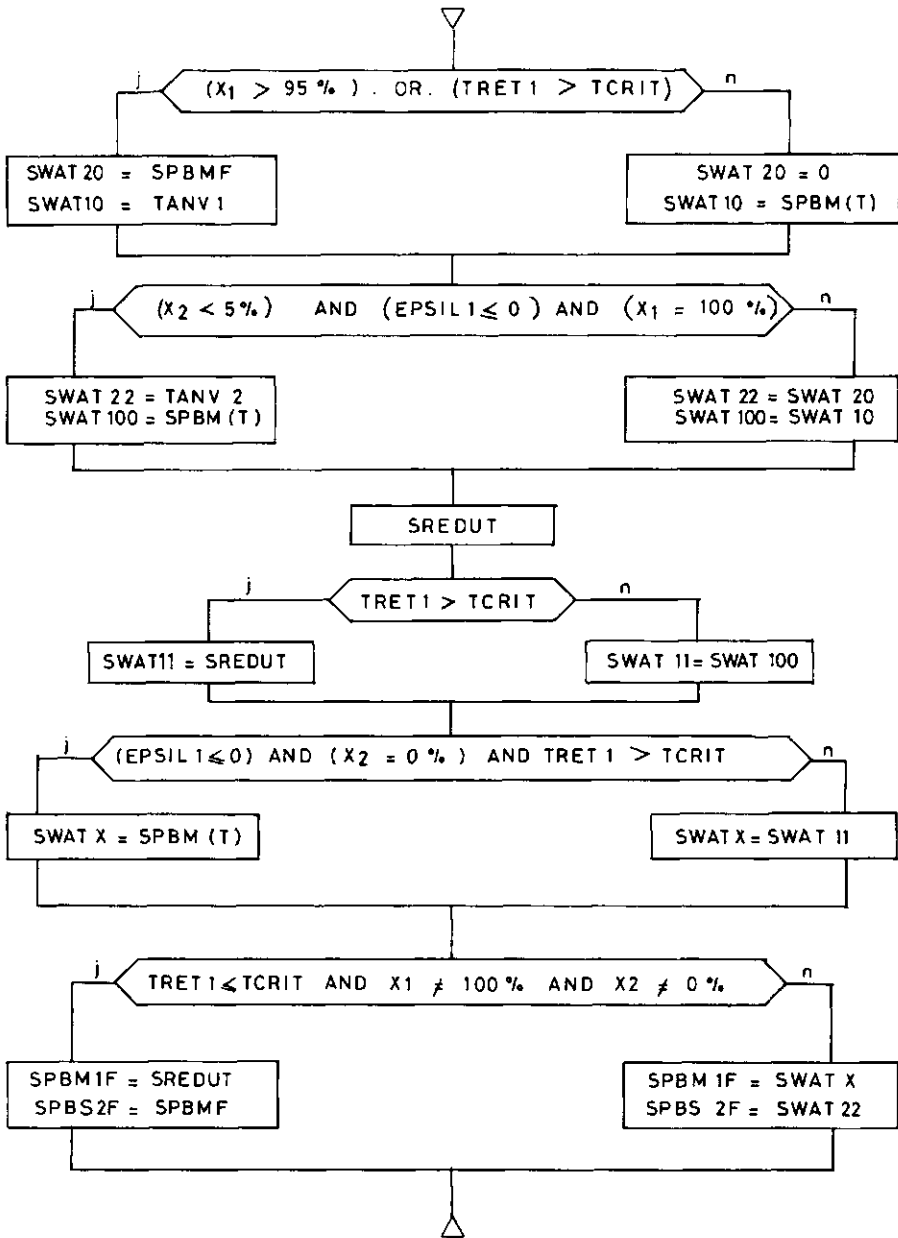


FIG. 6.9

De hiervoor genoemde basisvergelijking SREDUT is als blok aangegeven.  
In FIG. 6.9 worden de volgende van belang zijnde parameters gebruikt:

- X1 : klepstand van het AW-net
- X2 : klepstand van het KW-net
- TCRIT : maximale retourtemperatuur van het AW-net
- TRET1 : actuele retourtemperatuur van het AW-net

SPBM1F : setpoint voor de aanvoertemperatuur van het AW-net  
 SPBS2F : setpoint voor de aanvoertemperatuur van het kW-net

Allereerst wordt getest of het ketelwarmtenet (KW-net) bijgeschakeld moet worden. Dit is het geval als  $X1 > 95\%$  of  $TRET1 > TCRIT$ . In de praktijk wordt een klepstand  $< 5\%$  als dicht gezien, en  $> 95\%$  open. Wordt aan een van deze condities voldaan, dan wordt de MAST-KW geactiveerd en het setpoint voor de aanvoertemperatuur van het AW-net (SWAT10) gelijk gemaakt aan TANV1 (geen sturing van het AW-net vanuit MAST-AW). Indien het AW-net reeds  $100\%$  open was, dan blijft de MAST-KW in bedrijf. Voldoen geen van beide voorwaarden, dan blijft het KW-net dicht en het AW-net in werking. Hierna wordt bekeken of er zich een situatie voordoet waarin het KW-net is dichtgelopen, het nog steeds te warm is in de kas en waarbij het AW-net volledig open staat. Komt deze situatie voor, dan blijft het KW-net dicht en wordt teruggeschakeld naar de MAST-AW, zo niet dan blijft de MAST-KW in bedrijf. Vervolgens wordt de reductie voor het AW-net SREDUT (formule 6.1.5) bepaald. Indien nu  $TRET1 > TCRIT$ , dan wordt het reductie-algorithme aangeschakeld, is  $TRET1 < TCRIT$  dan blijft het geheel onveranderd. Er kan nu nog een situatie voorkomen waarbij  $EPSIL1 < 0$ ,  $X2 =$  dicht en  $TRET1 > TCRIT$ . Het AW-net wordt dan weer door de MAST-AW teruggeregeld. Indien nu wordt getest op de situatie:  $TRET1 < TCRIT$ , waarbij  $X1$  niet open en  $X2$  niet dicht is, kan zich dit alleen maar voordoen, nadat een situatie heerste waarbij  $TRET1 > TCRIT$ , en het AW-net teruggeregeld was. Is nu door dit terugregelen  $TRET1 < TCRIT$  geworden, waarbij het KW-net nog niet is dichtgelopen, dan blijft het reductie-algorithme de retourwatertemperatuur van het AW-net regelen. De MAST-KW regelt dan de luchttemperatuur in de kas. Dit resulteert in een uiteindelijk setpoint voor de aanvoertemperatuur TANV1 en TANV2 van respectievelijk SPBM1F en SPBS2F. Deze parameters vormen de setpoints voor de SLAVE-regelaars. Dit algoritme is weergegeven in FIG. 6.10.

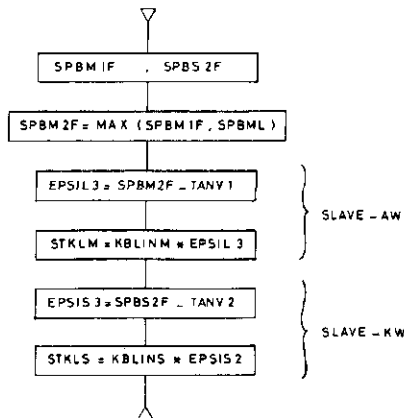


FIG. 6.10

Hierin is:

SPBML : de minimum pijptemperatuur van het AW-net  
 SPBM2F : het setpoint voor TANV1  
 EPSIL3 : het foutsignaal SLAVE-AW

SPBS2F : het setpoint voor TANV2  
 EPSIS2 : het foutsignaal SLAVE-KW  
 KBLINM : de proportionaliteitsfactor AW-net  
 KBLINS : de proportionaliteitsfactor KW-net  
 STKLM : het stuursignaal AW-klep [sec]  
 STKLS : het stuursignaal KW-klep [sec]

Doordat een tuinder de mogelijkheid moet hebben een minimum pijptemperatuur in te stellen (SPBML), wordt eerst bepaald of de door de MAST-AW vereiste waarde  $SPBMLF < SPBML$ . De parameter SPBM2F is het uiteindelijke setpoint voor TANV1 geworden. Het foutsignaal voor de SLAVE-AW kan nu worden berekend uit:  $EPSIL3 = SPBM2F - TANV1$ . Dit geldt eveneens voor de SLAVE-KW:  $EPSIS3 = SPBS2F - TANV2$ . Dit resulteert in de voor de regelkleppen benodigde stuursignalen:

$$STKLM = KBLINM * EPSIL3 \quad (P\text{-actie})$$

$$STKLS = KBLINS * EPSIS3 \quad (P\text{-actie})$$

De signalen STKLM en STKLS zijn de ingangssignalen voor het model van het regelproces ( Zie FIG. 4.2).

Het regelalgoritme wordt nu getest en beoordeeld in verschillende belastingssituaties. Het tijdsinterval waarin de simulatie plaatsvindt is tenzij anders vermeld 24 uur. Het setpoint voor de luchttemperatuur in de kas komt overeen met praktische waarden. Omdat het voor de beoordeling van het totale regelalgoritme van groot belang is dat de SLAVE-regelaars juist zijn ingesteld, worden deze als eerste behandeld. In FIG. 6.11 is ter beoordeling van de SLAVE-AW een simulatie weergegeven, waarbij voornamelijk het AW-net alleen in bedrijf is. Het setpoint voor de regeling is SP-WAT1, de geregelde grootte is de aanvoertemperatuur TANV1 en de bijbehorende klepstand  $X1 [0,1]$ . De optimale instelling van de proportionaliteitsfactor van de SLAVE-AW,  $KBLINM = 2$ . In het algemeen volgt TANV1 het setpoint SP-WAT1 zeer goed. Een te laag of te hoog ingestelde P-factor is snel uit de metingen af te leiden en dus te corrigeren. Bij het terugregelen van het net blijft TANV1 iets achter op SP-WAT1 (niet-lineariteit opwarmen/afkoelen), echter zonder verder problemen op te leveren. Een soortgelijke simulatie is verricht voor de beoordeling van de SLAVE-KW (FIG. 6.12). De optimale instelling van dit net  $KBLINS = 1.3$ . Ook in deze regeling volgt de gemeten waarde TANV2 het setpoint SP-WAT2 uitstekend. Met behulp van deze instellingen kunnen nu de regelparameters van de MASTER-regelaars en het REDUCTIE-algoritme worden bepaald.

Voor het regelalgoritme geldt dat voor een optimaal gebruik van alternatieve warmte, begrenzingen worden gesteld in de grootte van de regelparameters (Verwaayen P.W.T., 1987). De absolute waarde van de instellingen is een compromis met enerzijds de optimale inzet van alternatieve warmte, en anderzijds het regelgedrag. Aan de hand van een aantal gesimuleerde regelsituaties (dynamische overgangen) zijn de optimale instellingen van de regelparameters afgeschat. Bij het regelen en schakelen van twee aparte verwarmingssystemen aangesloten op verschillende warmtebronnen, is een verlaging van de regelparameters noodzakelijk (Verwaayen P.W.T., 1987). Bij het overschakelen van AW -> KW en omgekeerd wordt als het ware een extra dode tijd geïntroduceerd, die tot gevolg heeft dat de regeling bij te grote P-factoren en te kleine integratieconstanten (I-factoren) snel instabiel wordt. Uit simulaties van de totale regeling zijn de volgende waarden voor de regelparameters bepaald:

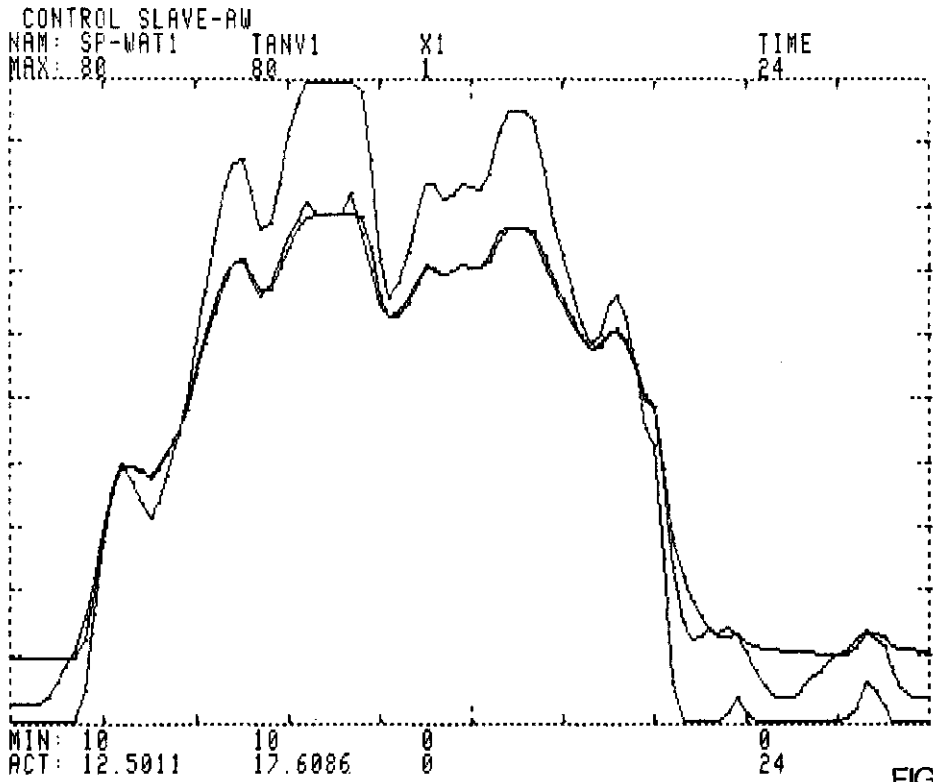


FIG. 6.11

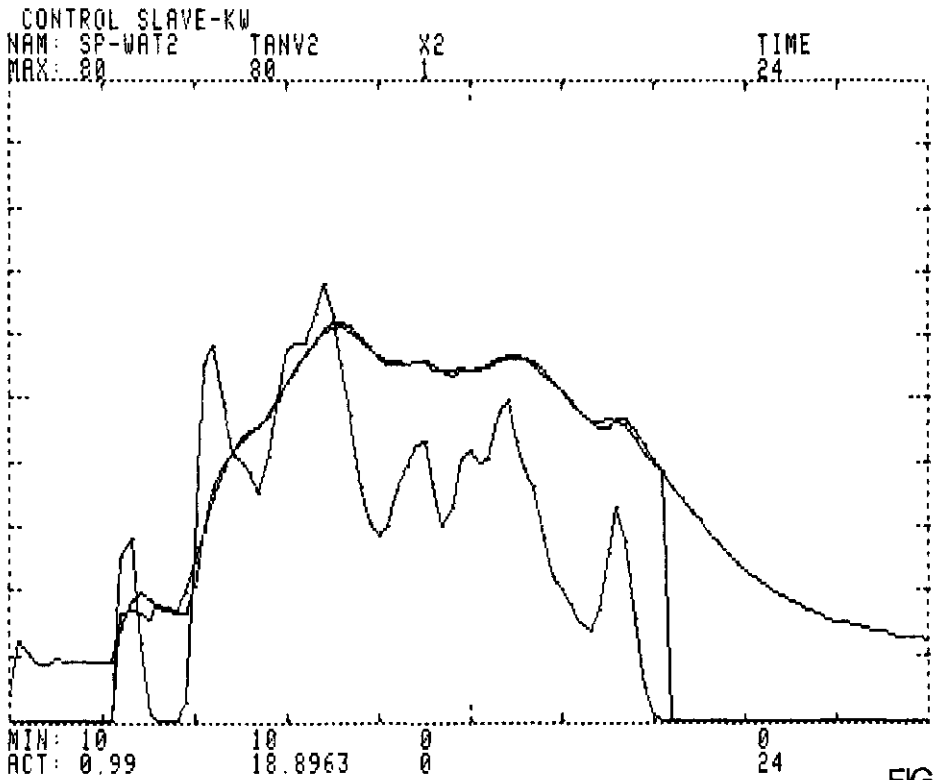


FIG. 6.12

KBKO = 5.0  
 KBINT = 0.8  
 SPBMHN = 3.0  
 SPBMHD = 0.33  
 KBALG = 0.98

In FIG. 6.13 is een responsie weergegeven waarbij het model wordt belast met een gemiddelde buitentemperatuur van 8 oC. Het verschil tussen de maximum en minimum buitentemperatuur is 6 oC. De warmte-overdrachtscoëfficiënt naar buiten  $KKAS=6.5 \text{ W/m}^2\cdot\text{oC}$  (Breuer J.J.G., 1987). Het setpoint verloopt van 17 oC in de nacht naar 22 oC overdag, waarbij de stijgsnelheid 1 oC/uur bedraagt. Vanuit een begintoestand  $X1 = 0.25$  en  $X2 = 0$  wordt het AW-net langzaam opengeregeld. Om ongeveer 5 uur is  $X1 = 1$  en wordt overgeschakeld naar het KW-net. De overshoot ten gevolge van de verhoging van het setpoint is zeer gering. Hierbij is de reactie van het 'Modified' algoritme goed herkenbaar. Het KW-net blijft tot 16.30 uur in bedrijf, terwijl hierbij het AW-net volledig open staat ( $X1=1$ ). Wanneer naar het nachtsetpoint van 17 oC wordt geschakeld, zal eerst het KW-net dichtlopen. Indien  $X2=0$ , zal ook het AW-net dichtlopen, waarna de resterende nacht het AW-net toereikend is. De maximaal toelaatbare retourtemperatuur van het AW-net  $TCRIT$  is hier ingesteld op 40 oC. In de simulatie van FIG. 6.14 is het model belast met soortgelijke buitenomstandigheden, echter ook met een sinusvormige instraling (buiten-max =  $300 \text{ W/m}^2$ ). Het KW-net zal ten gevolge van de aanwezige instraling snel dichtlopen, waarna het AW-net de regeling overneemt. De overshoot in de geregelde luchttemperatuur als gevolg van deze instraling is echter onvermijdelijk. Om omstreeks 15:30 uur is het AW-net weer volledig geopend, waardoor het KW-net weer aangesproken wordt. De regeling blijft onder invloed van de aanwezige instraling voldoende nauwkeurig functioneren.

Aan de hand van de simulatie in FIG. 6.15 wordt de regeling getest op het openen en sluiten van de schermen, waarbij de buitentemperatuur en de instraling gelijk is aan de vorige simulatie. Dit openen en sluiten heeft een verandering in de warmteoverdrachtscoëfficiënt van de kas tot gevolg ( $KKAS$  bij gesloten schermen =  $3.5 \text{ W/m}^2\cdot\text{oC}$ ). In FIG. 6.15 worden om 6:30 uur de schermen geopend. Dit heeft een snelle daling van  $TKAS$  tot gevolg, waardoor het KW-net snel bijkomt. Naarmate de dag vordert, neemt de instraling toe. Dit is er de oorzaak van dat om 9:00 uur het KW-net sluit. Doordat het tijdstip van het sluiten van de schermen (18:00 uur) later plaatsvindt dan de dag -> nacht overgang van het setpoint, is dit in de geregelde  $TKAS$  praktisch niet zichtbaar. Anders ziet de responsie eruit, indien onder dezelfde buitenomstandigheden de schermen later worden geopend (FIG. 6.16). Doordat de warmte-inhoud van het verwarmingssysteem nu groter is, leidt dit tot een geringere temperatuur-daling. Eveneens is de overshoot ten gevolge van de instraling lager. Dit tijdstip van openen wordt regeltechnisch gezien verkozen boven het eerder vermelde tijdstip. Doordat bij het vroeger sluiten van de schermen de verwarmingssystemen ook een grotere warmte-inhoud hebben, zal nu ook hierbij een overshoot van  $TKAS$  optreden. Doordat overshoot in de geregelde grootte vermeden dient te worden, wordt regeltechnisch gezien de voorkeur gegeven aan het later sluiten van de schermen ten opzichte van de dag -> nacht overgang (FIG. 6.15). In alle gevallen reageert de regeling uitstekend op de aangebrachte belastingsvariaties.

Doordat in de huidige situatie de AW-retourtemperatuur niet boven de gestelde maximale begrenzing uitkomt, wordt voor het uittesten van het reductie-algoritme deze begrenzing verlaagd van  $TCRIT = 33 \text{ oC}$ . In



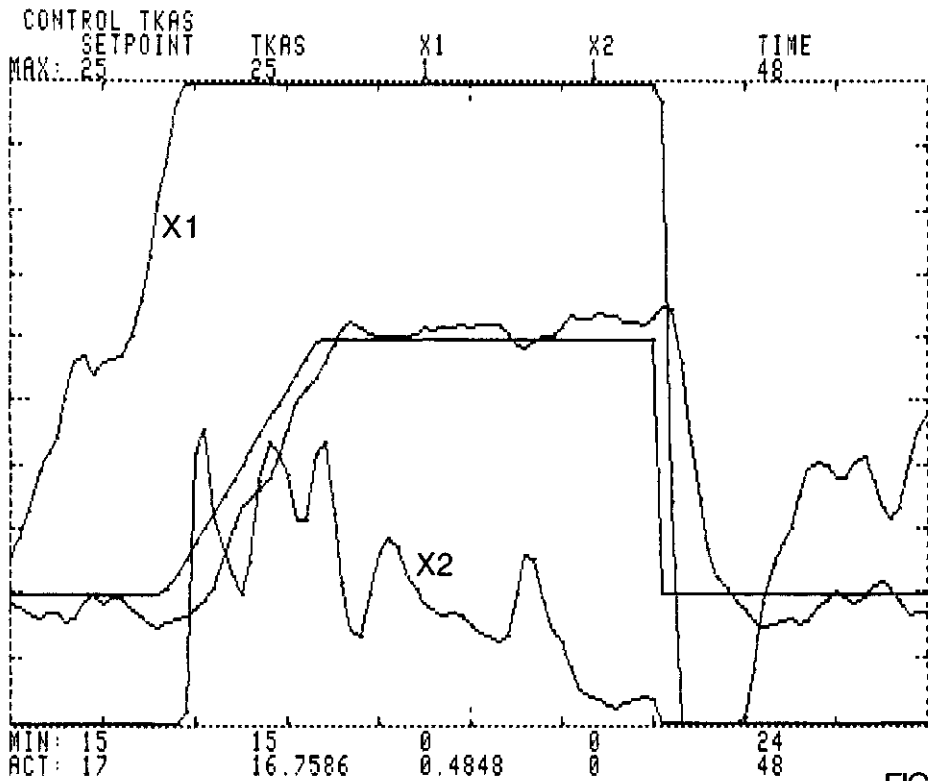


FIG. 6.13

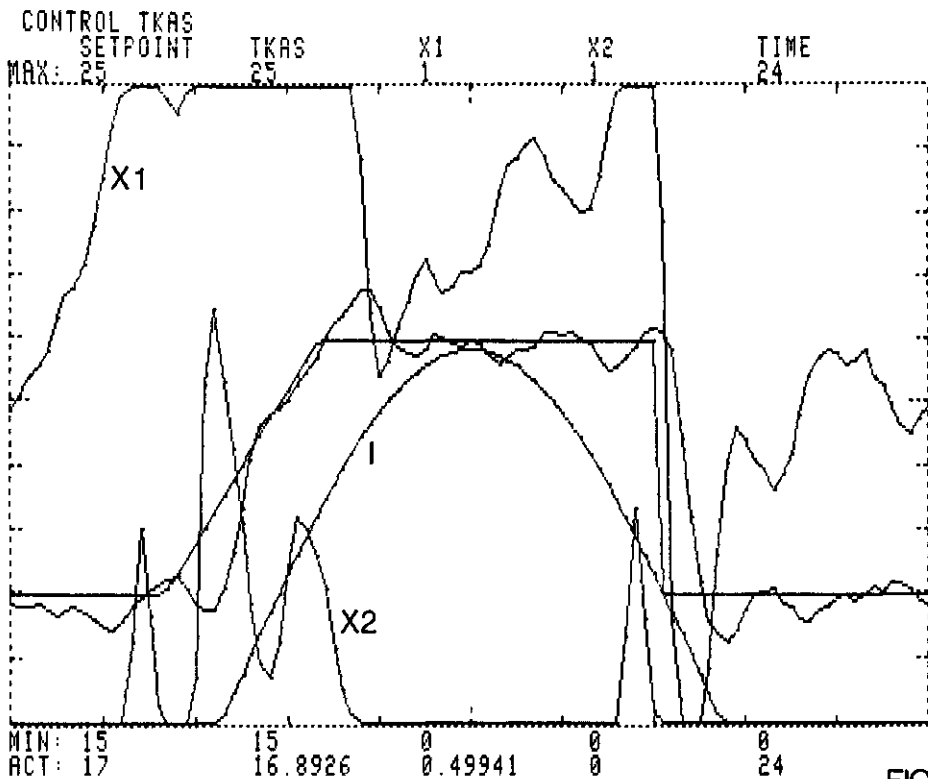


FIG. 6.14

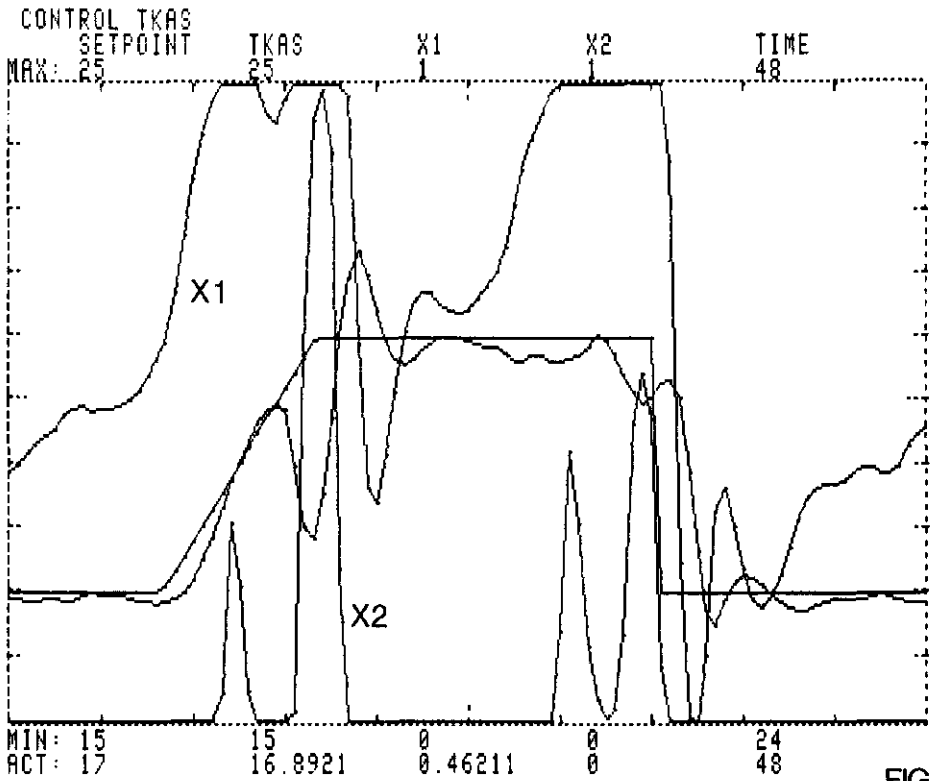


FIG. 6.15

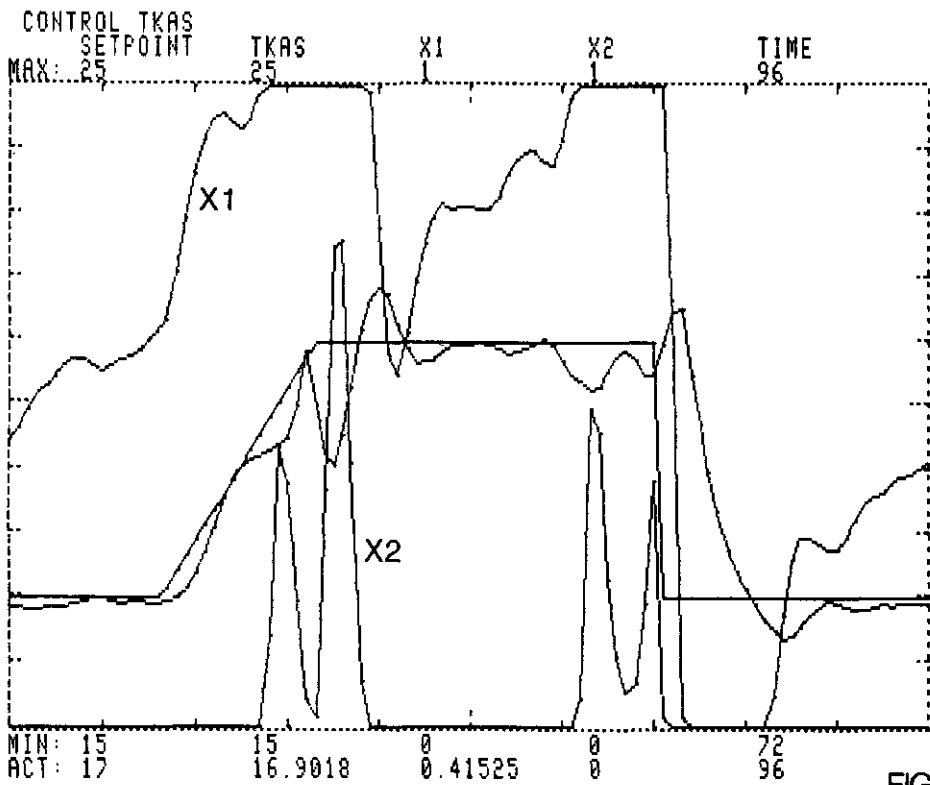


FIG. 6.16

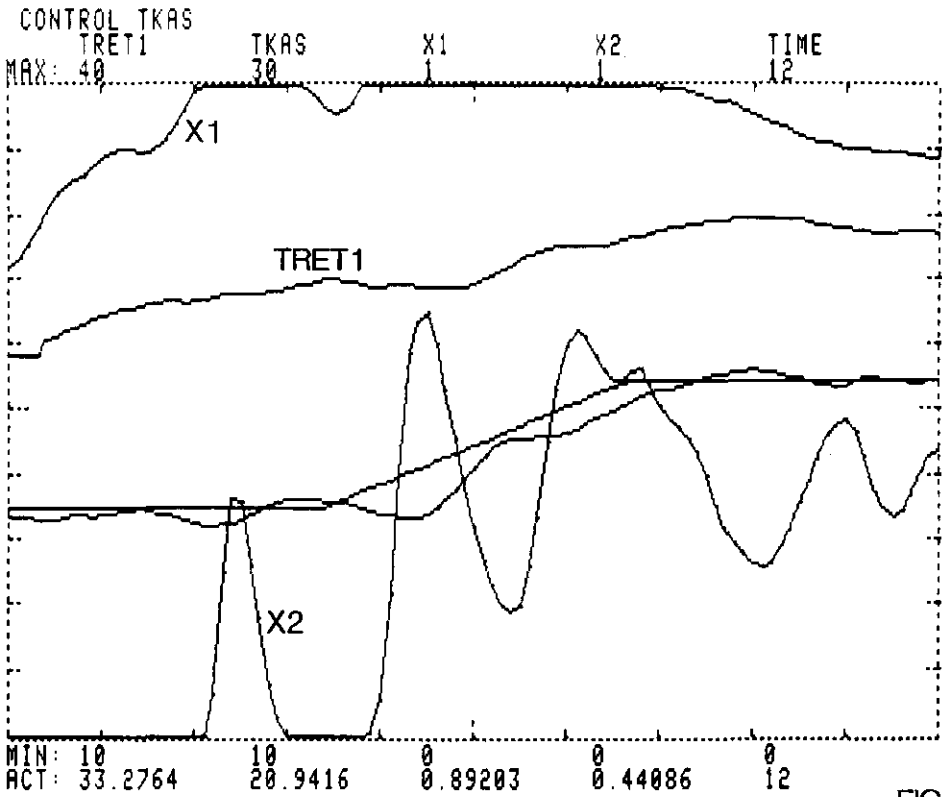


FIG. 6.17

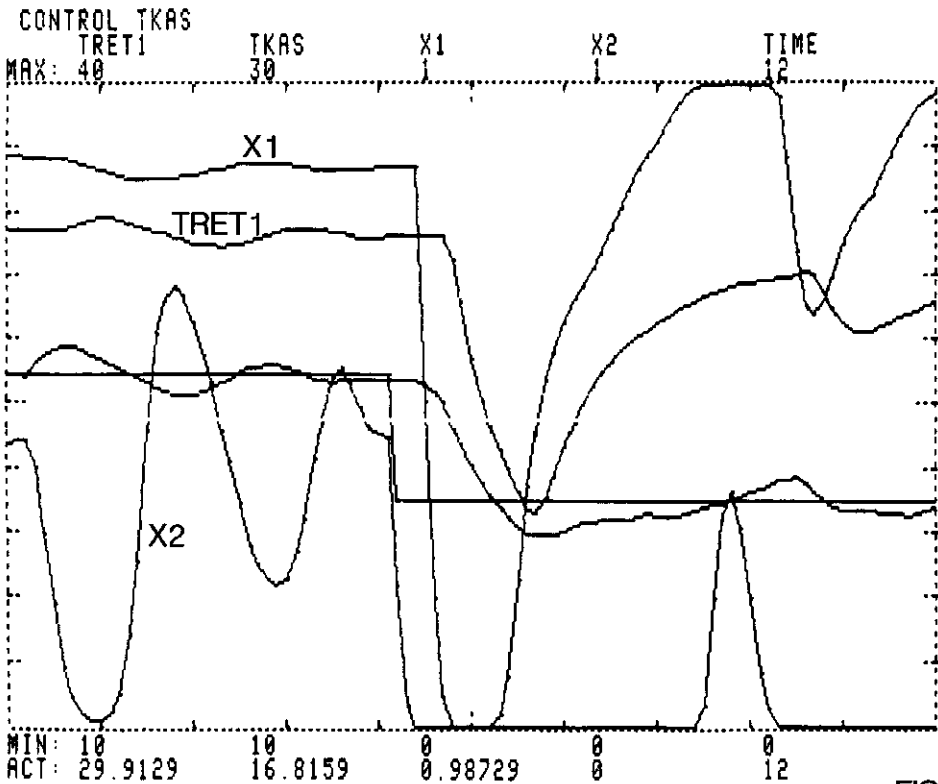


FIG. 6.18

FIG. 6.17 is voor de eerste 12 uur van de dag de responsie weergegeven. Hierbij gelden dezelfde buitenomstandigheden als in FIG. 6.16, waarbij echter de schermen ook gedurende de nacht zijn geopend en de instraling gedurende de dag nul is. Om ongeveer 8:00 uur zal door de toename van TKAS (opstoken) TRET1 oplopen tot boven de maximale begrenzing ( $TRET1 > TCRIT$ ); het reductie-algorithme volgens formule 6.1.5 treedt in werking. In FIG. 6.17 is te zien dat X1 wordt verlaagd terwijl de MAST-KW de regeling van TKAS blijft verzorgen. FIG. 6.18 toont het verdere verloop van de dag (12:00 tot 24:00 uur). Indien de belasting van de kas nu groter is als de momentane levering door het AW-net, dan zal de MAST-KW in bedrijf blijven. Het reductie-algorithme zorgt ervoor dat TRET1 op het setpoint van  $TCRIT = 33$  oC geregeld wordt. Om 17:00 uur schakelt het setpoint voor TKAS over naar het nachtniveau. De MAST-KW blijft in bedrijf totdat de KW-regelklep ( $X2 = 0$ ) gesloten is. Vervolgens treedt de situatie op waarbij het AW-net wordt geregeld door het reductie-algorithme,  $X2 = 0$  en  $EPSILL < 0$  (te warm in de kas). Dit houdt in dat de regeling van het AW-net weer wordt overgenomen door de MAST-AW, en dus snel dichtgestuurd wordt. Door de verlaging van het setpoint (nachtinstelling) komt het tot 24:00 uur niet meer voor dat de kritische retourtemperatuur van het AW-net wordt overschreden. Ondanks het in-, uit- en overschakelen van het reductie-algorithme en de MASTER-regelaars in verschillende belastingssituaties, blijft de regeling van TKAS stabiel en nauwkeurig werken.

## 7. Praktische beoordeling regelalgorithme.

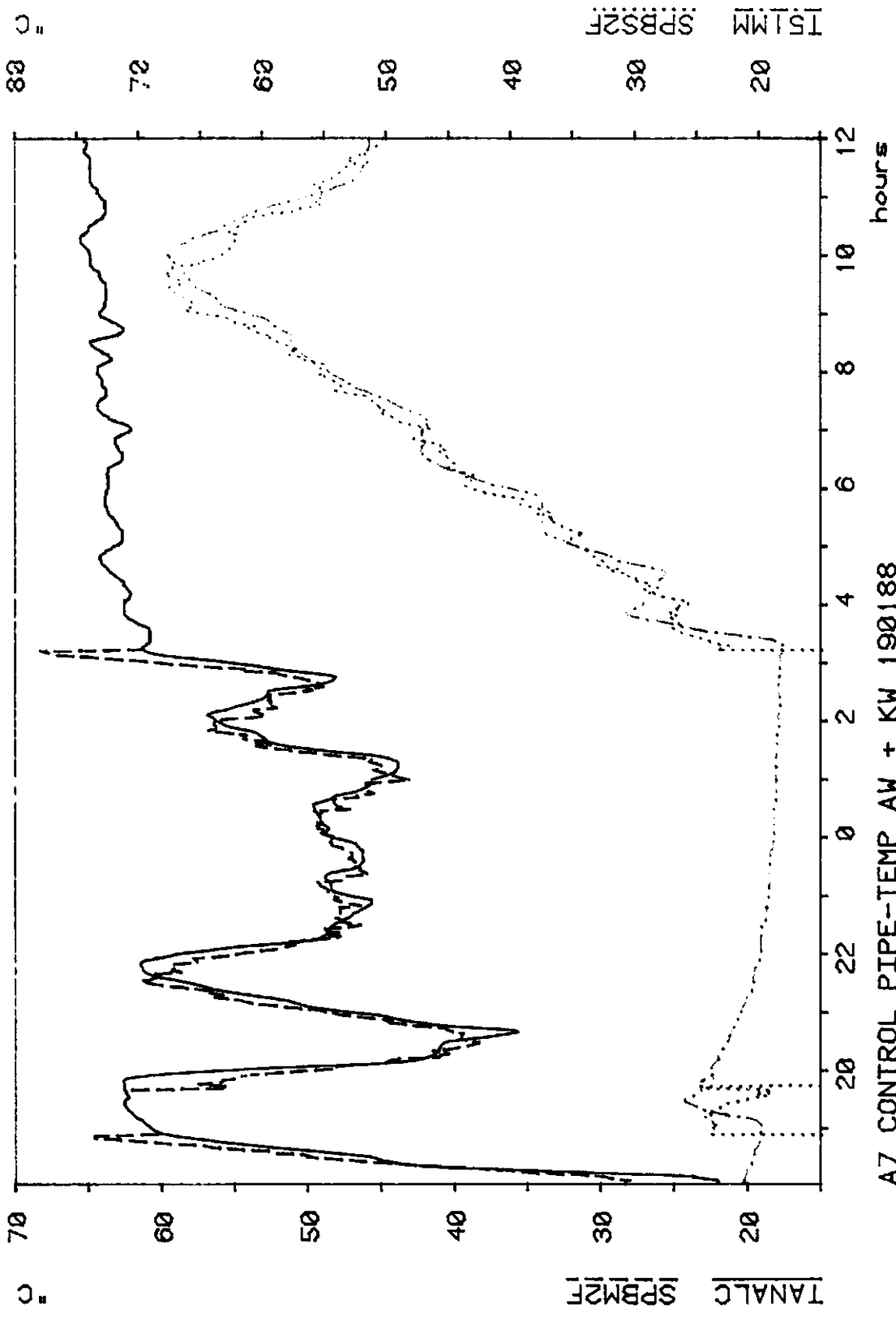
-----

Het regelalgorithme dat binnen het simulatiemodel is getest, is ontstaan uit het vertalen van de flowdiagrammen van FIG. 6.8 t/m FIG. 6.10 naar een algorithme bestaande uit een combinatie van de in PSI beschikbare blokken. Op deze wijze kon het algorithme met behulp van het ontworpen kasmodel volledig op simulatie-niveau worden geevalueerd. Om het regelalgorithme operationeel te maken in het praktische systeem (decentrale kasklimaat-regelsysteem), worden de flowdiagrammen vertaald naar de programmeertaal FORTRAN. Ten behoeve van de vergelijking model versus praktijk zijn de op model-niveau (PSI) nogal omslachtige conditionele statements, op een zelfde wijze in het FORTRAN-programma overgenomen. Na implementatie van het regelalgorithme in het kasklimaat-regelsysteem, kan de regeling een praktische beoordeling ondergaan. Zoals bij de regeling op model-niveau, geldt ook bij de praktische regeling dat het voor de beoordeling van het totale regelalgorithme van belang is dat de SLAVE-regelaars goed staan ingesteld. Vandaar dat ook hier als eerste aandacht aan wordt geschonken. In FIG. 7.1 is van meetdag 190188 een responsie van de SLAVE-regelaars opgenomen. Hierbij geldt:

TANALC = TANV1 = aanvoertemperatuur van het AW-net  
 SPBM2F = het setpoint voor TANV1  
 T51MM = TANV2 = aanvoertemperatuur van het KW-net  
 SPBS2F = het setpoint voor TANV2

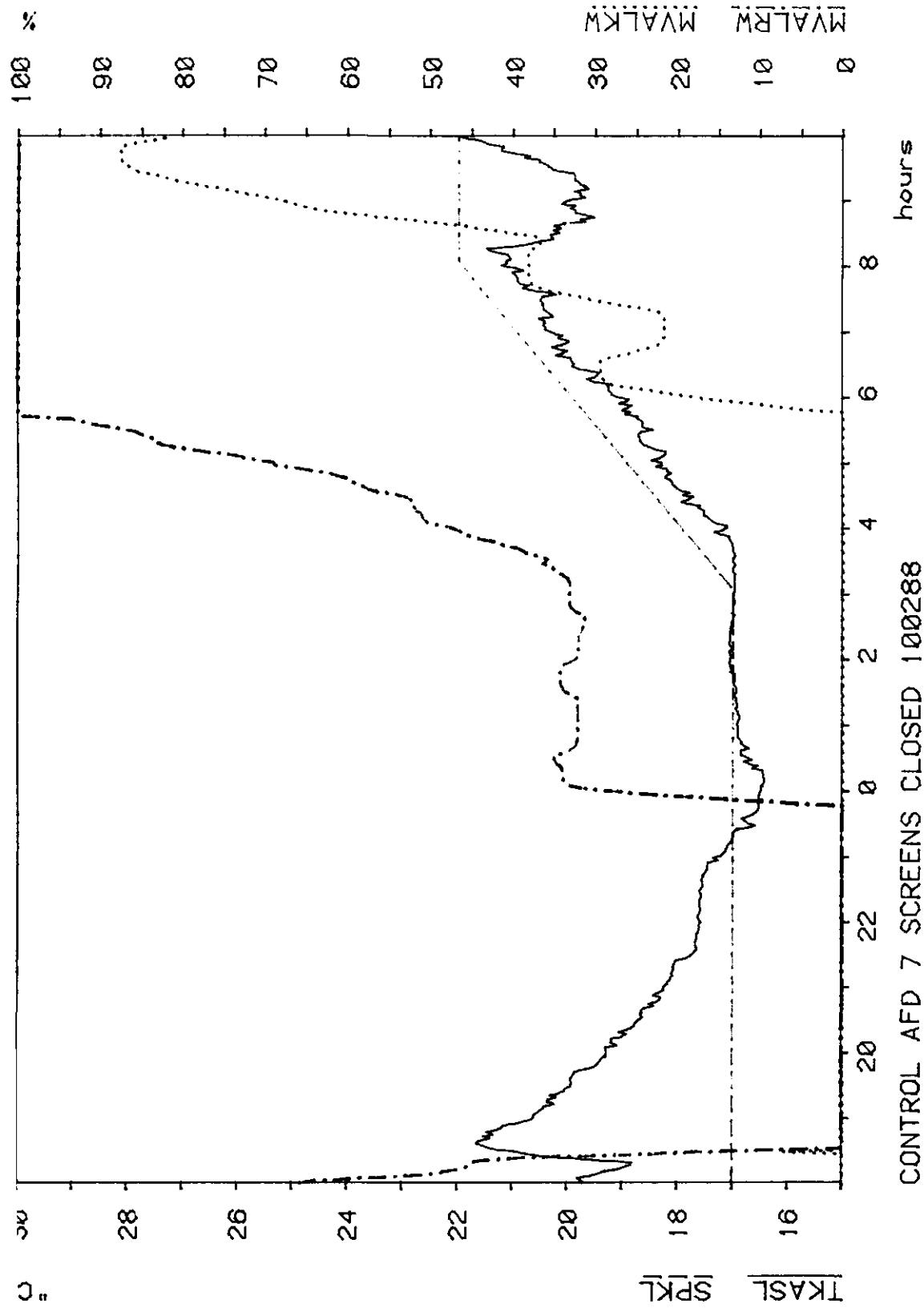
Om ongeveer 19:00 uur wordt TANALC = SPBM2F, wat betekent dat op dat moment het AW-net volledig open staat en overgeschakeld wordt naar de MAST-KW. Vanaf 19:45 uur komt echter de MAST-AW weer in bedrijf, zodat TANALC weer wordt geregeld. In de tussenliggende tijd is de MAST-KW aangeschakeld, om vervolgens vanaf 3:00 uur in te blijven. In FIG. 7.1 is te zien dat TANALC het setpoint SPBM2F uitstekend volgt; dit geldt eveneens voor T51MM op het setpoint SPBS2F. Bij het terugregelen van de netten blijft door het sterke niet-lineaire gedrag van het regelproces de aanvoertemperatuur van het betreffende net wat achter op de gewenste waarde. Dit achterblijven leidt echter niet tot een onaanvaardbaar gedrag van de SLAVE-regeling. Zowel de SLAVE-AW als de SLAVE-KW zijn met respectievelijk KBLINM = 2 en KBLINS = 1.3 goed ingesteld en komen dus overeen met de in de simulaties gevonden waarden. De praktische beoordeling van de MASTER-regelaars en het reductie-algorithme vindt plaats aan de hand van een aantal willekeurige meetnachten, waarbij verschillende belastingssituaties voorkomen. Tevens zal ter validatie van het ontworpen model voor het regelalgorithme in combinatie met het regelproces, het model worden belast met dezelfde buitentemperatuur als bij het praktische systeem het geval is. Op deze wijze is te controleren of het regeltechnisch model voldoende nauwkeurig werkt voor het beoogde doel: een verantwoorde regeltechnische simulatie van het totale regelproces.

In FIG. 7.2 is meetnacht 100288 opgenomen, waarbij de buitentemperatuur (TBUIT) afkoelt van 5 oC om 18:00 uur tot ongeveer 0 oC om 9:00 uur. Doordat vlak voor 18:00 uur wordt overgeschakeld naar het nachtsetpoint, is het foutsignaal EPSIL1 = SPKL - TKASL sterk negatief. Hierdoor wordt de regelklep van het AW-net (MVALRW) snel dichtgestuurd. Om ongeveer 23:30 uur wordt EPSIL1 positief, zodat het AW-net weer open gaat. In het verdere verloop van de nacht neemt langzaam de warmtebehoefte van de kas toe, waardoor het AW-net om omstreeks 5:00 uur volledig open is. De MAST-KW neemt nu de regeling van de luchttemperatuur (TKASL) over.



A7 CONTROL PIPE-TEMP AW + KW 190188

FIG. 7.1



CONTROL AFD 7 SCREENS CLOSED 100288  
FIG. 72

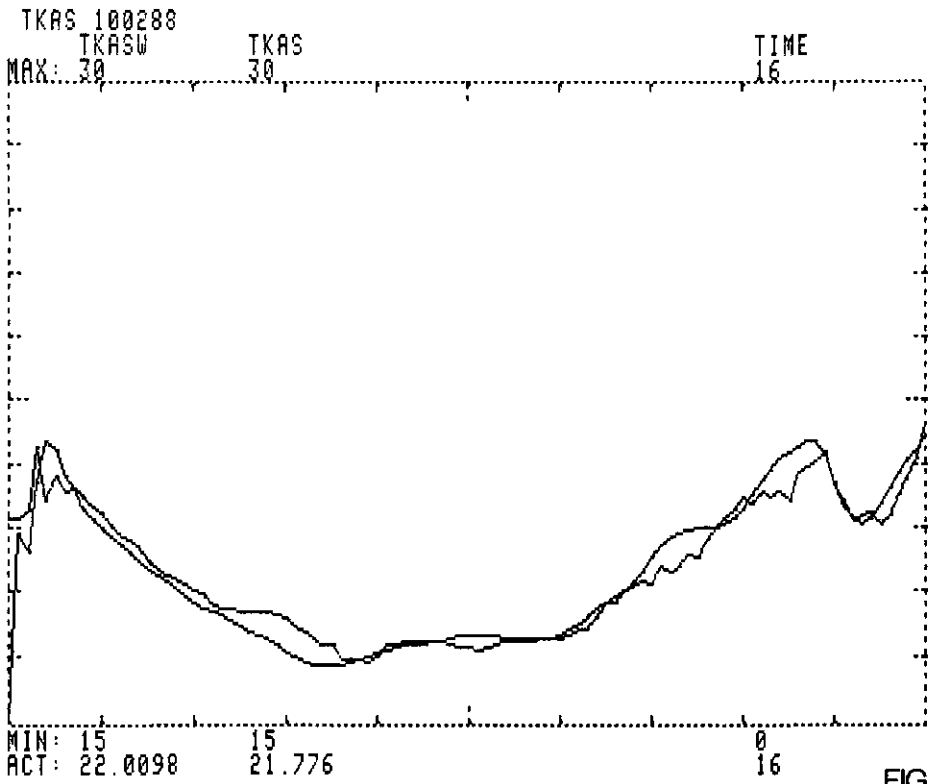


FIG. 7.3

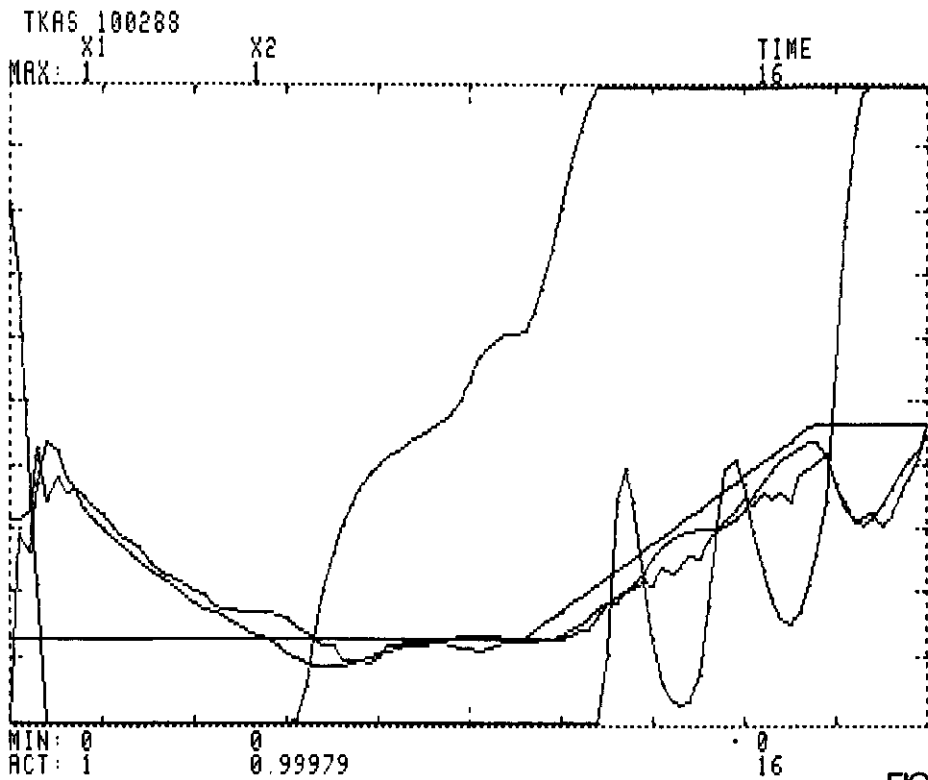


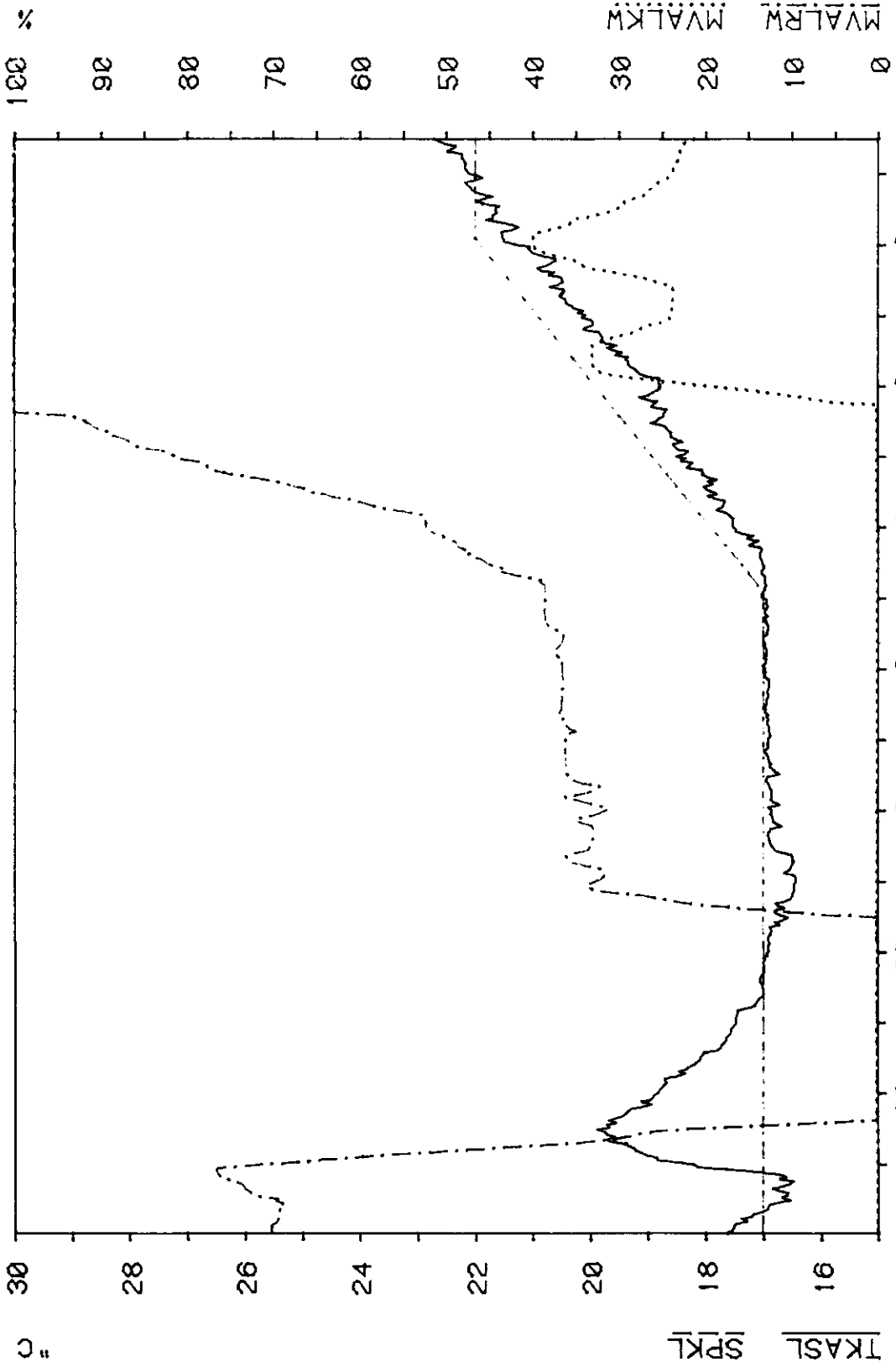
FIG. 7.4



De MAST-KW regelt zodanig dat het bijschakelen van het KW-net op een soepele wijze plaatsvindt, en hierdoor de stabiliteit van TKASL niet in gevaar komt. De kritische retourtemperatuur van het AW-net, waarbij het reductie-algoritme moet ingrijpen (TCRIT), is hier ingesteld op 40 oC, zodat dit algoritme niet in werking komt. De plotseling sterke toename in de luchttemperatuur om 18:30 uur, wordt veroorzaakt door het sluiten van de schermen. Om ongeveer 8:00 uur openen de schermen, waardoor TKASL snel een aantal graden daalt. Het KW-net probeert deze daling zo snel mogelijk op te vangen, wat door de traagheid van het verwarmingssysteem enige tijd in beslag neemt. In een evenwichtstoestand (1:00 tot 3:00 uur) is te zien dat de statische afwijking naar nul gaat (integreerende regelactie).

Over het algemeen kan worden opgemerkt dat de regeling een stabiel gedrag vertoont, waarbij het AW-net zo goed mogelijk wordt benut. In FIG. 7.3 is van dezelfde meetnacht de door het model gegenereerde luchttemperatuur TKAS uitgezet tegen de werkelijk gemeten waarde TKASW. De waarde van de warmteoverdrachtscoëfficiënt van de kas is bij elke meetnacht afgeschat aan de optredende windsnelheid, buitentemperatuur en hemeltemperatuur (Breuer J.J.G., 1987). Afgezien van een inschakelverschijnsel aan het begin van de simulatie, blijkt TKAS erg goed TKASW te benaderen. Met betrekking tot het gestelde doel is het model voldoende nauwkeurig. Doordat bij de wiskundige benaderingen van het proces een aantal vereenvoudigingen zijn gesteld, ontbreekt de snelle dynamica (hogere frequenties) in de gesimuleerde luchttemperatuur. Indien aan FIG. 7.3 nog het setpoint SPKL en de klepstanden X1 (AW-klep) en X2 (KW-klep) worden toegevoegd, dan ontstaat FIG. 7.4. Wanneer de gesimuleerde klepstanden worden vergeleken met de gemeten klepstanden van FIG. 7.2, dan komen deze qua verloop en tijdstip van openen en sluiten goed met elkaar overeen. De buitenomstandigheden van meetnacht 11-febr-88 (FIG. 7.5) komen vrijwel overeen met die van meetnacht 10-febr-88. Daardoor vindt op ongeveer hetzelfde tijdstip de overschakeling plaats van de MAST-AW naar de MAST-KW. Ook hier ontstaat om ongeveer 19:00 uur door het sluiten van de schermen een snelle toename van de luchttemperatuur in de kas, waardoor het AW-net dichtloopt. De rest van de meetnacht is vergelijkbaar met die van FIG. 7.4. Doordat in deze meetnacht de schermen 's ochtends gesloten blijven, zal er aanzienlijk minder ketelwarmte geleverd hoeven te worden. Dit komt tot uitdrukking in de opening van de KW-klep. In FIG. 7.6 en FIG. 7.7 zijn ook van deze meetnacht respectievelijk de door het model gegenereerde waarde TKAS en de gemeten TKAS en het setpoint met de bijbehorende klepstanden weergegeven. Het verschil tussen de gemeten en gesimuleerde parameters is ook hier zeer gering.

In FIG. 7.8 is meetnacht 16-febr-88 opgenomen, waarbij de schermen om 19:30 uur gesloten worden, en 's ochtends dicht blijven. Aan de reactie van TKASL op het sluiten van de schermen is duidelijk de warmte-inhoud van de verwarmingssystemen af te leiden. Doordat nu bij het begin van de responsie de kleppen reeds dicht zijn, dus een lage warmte-inhoud in de verwarmingsnetten, is de overshoot van TKASL aanzienlijk geringer als in FIG. 7.5. Dit betekent dat het moment van schermen een belangrijke invloed heeft op de hoogte van het foutsignaal: SPKL - TKASL. Het verdere verloop van deze meetnacht komt overeen met dat van de vorige meetnachten, een adequate bijschakeling van ketelwarmte bij een goed volgende TKASL op het setpoint SPKL. Voor de evaluatie model tegen de werkelijkheid in FIG. 7.9 en FIG. 7.10 gelden soortgelijke opmerkingen als gemaakt bij de voorgaande nachten. Voor deze figuren geldt echter dat de begincondities waar de parameters op geïnitieerd dienen te worden moeilijker te realiseren zijn als in voorgaande simulaties



CONTROL AFD 7 SCREENS CLOSED 110288

FIG. 7.5

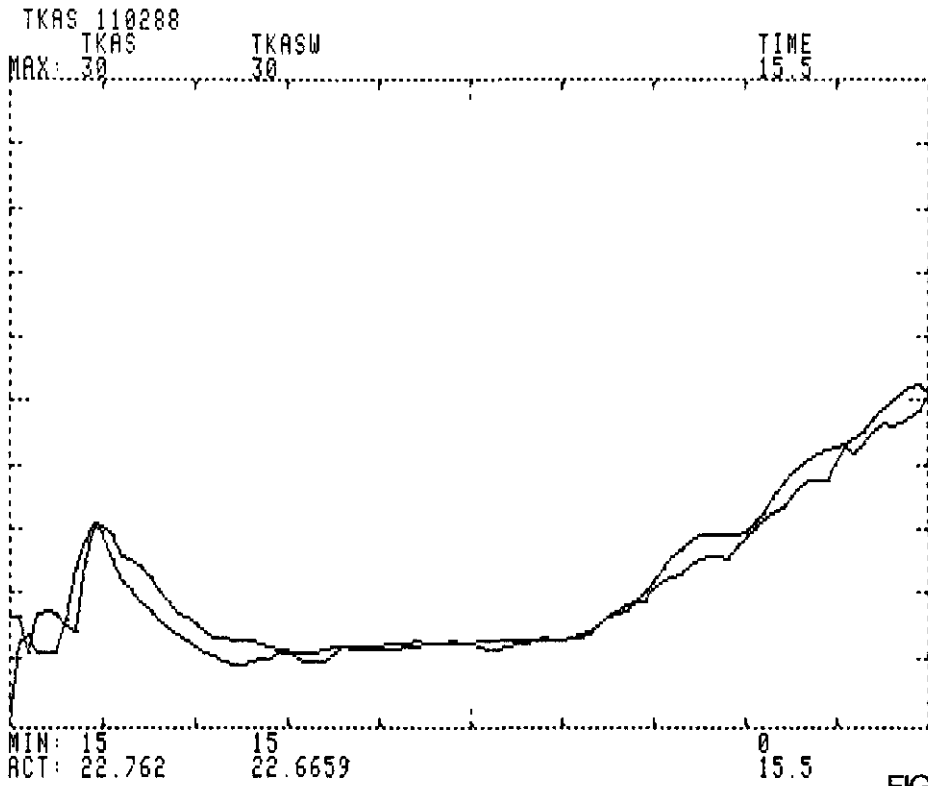


FIG. 7.6

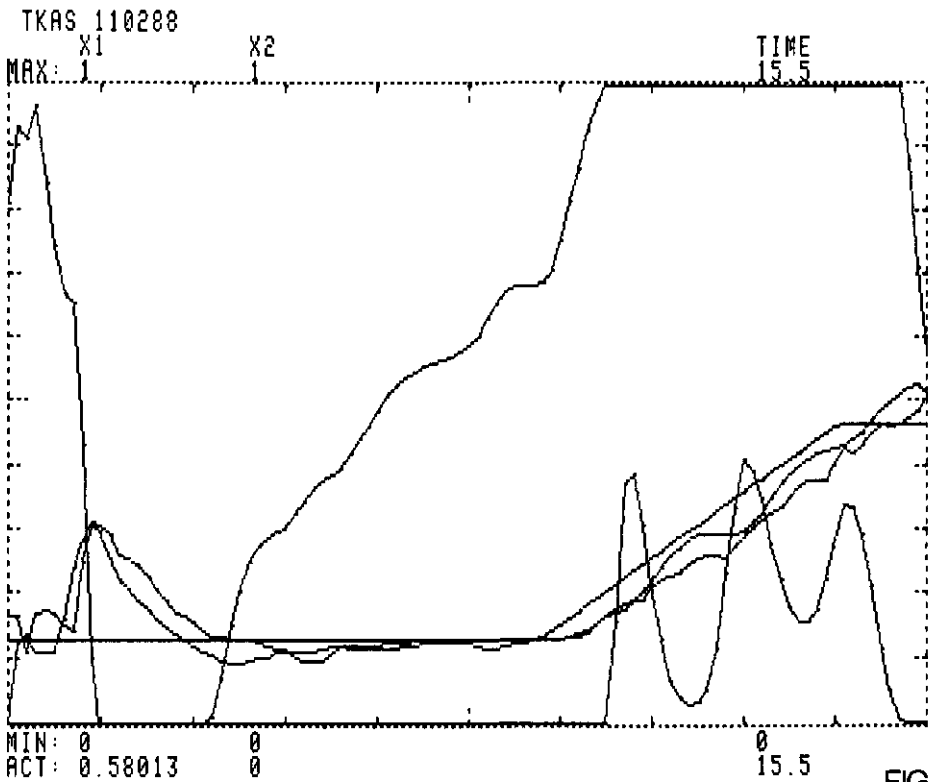
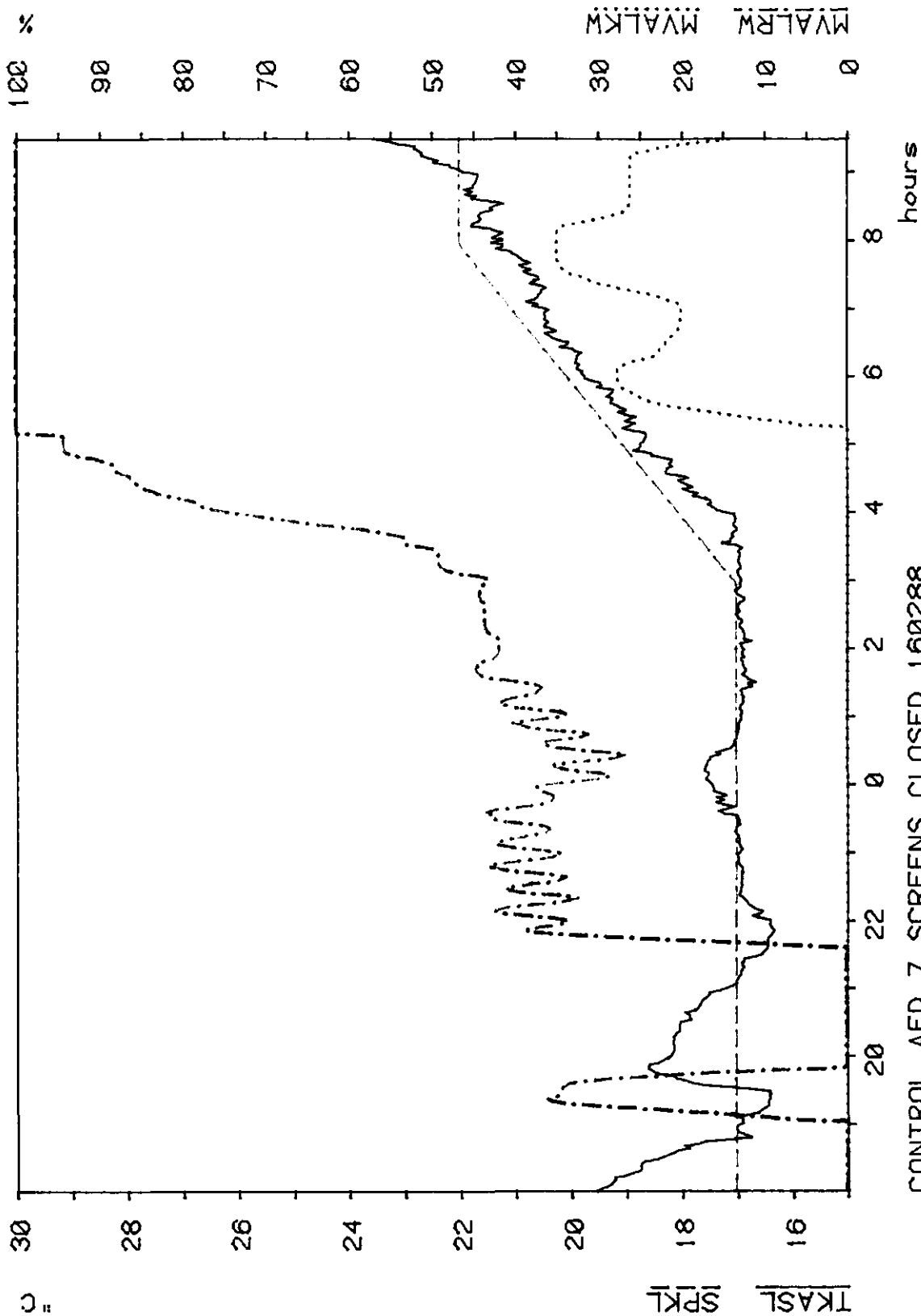


FIG. 7.7



CONTROL AFD 7 SCREENS CLOSED 160288

FIG. 7.8

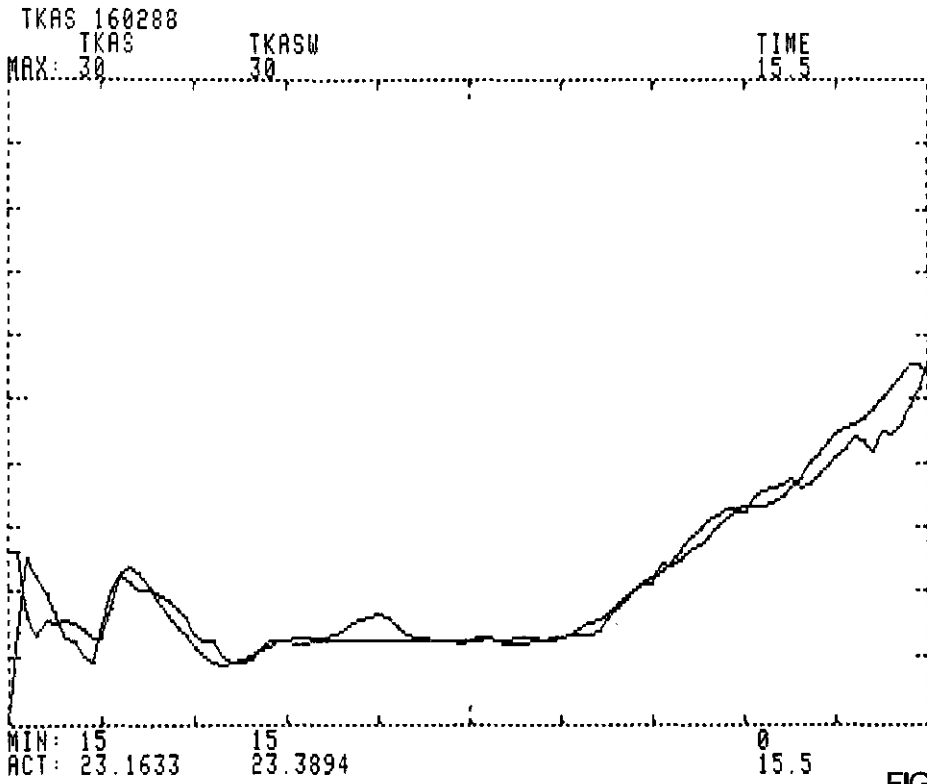


FIG. 7.9

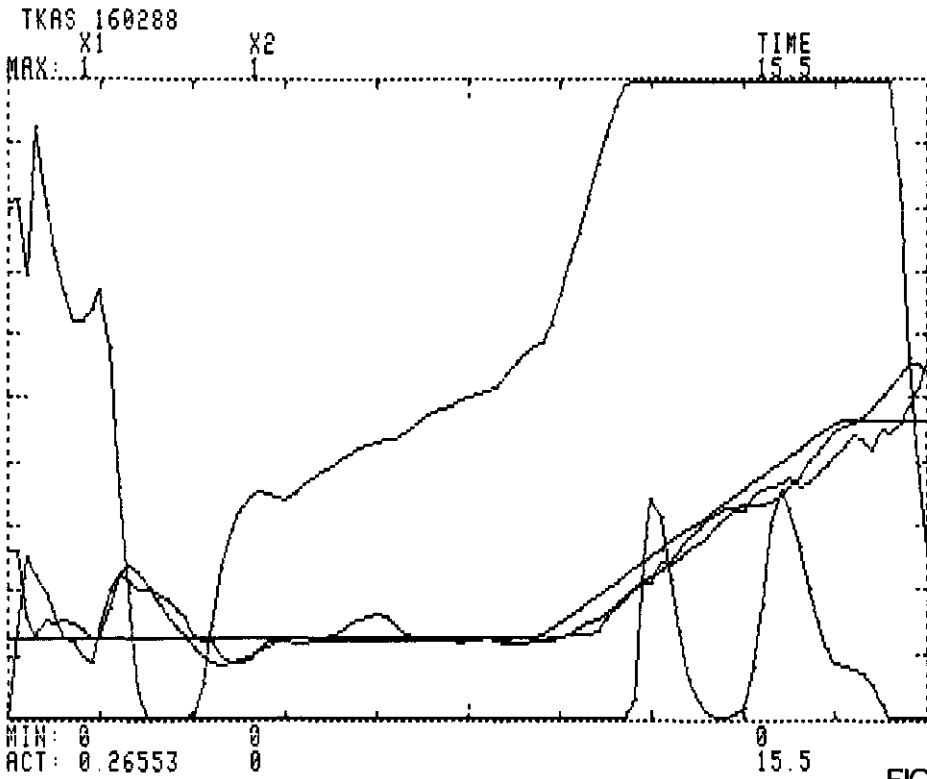
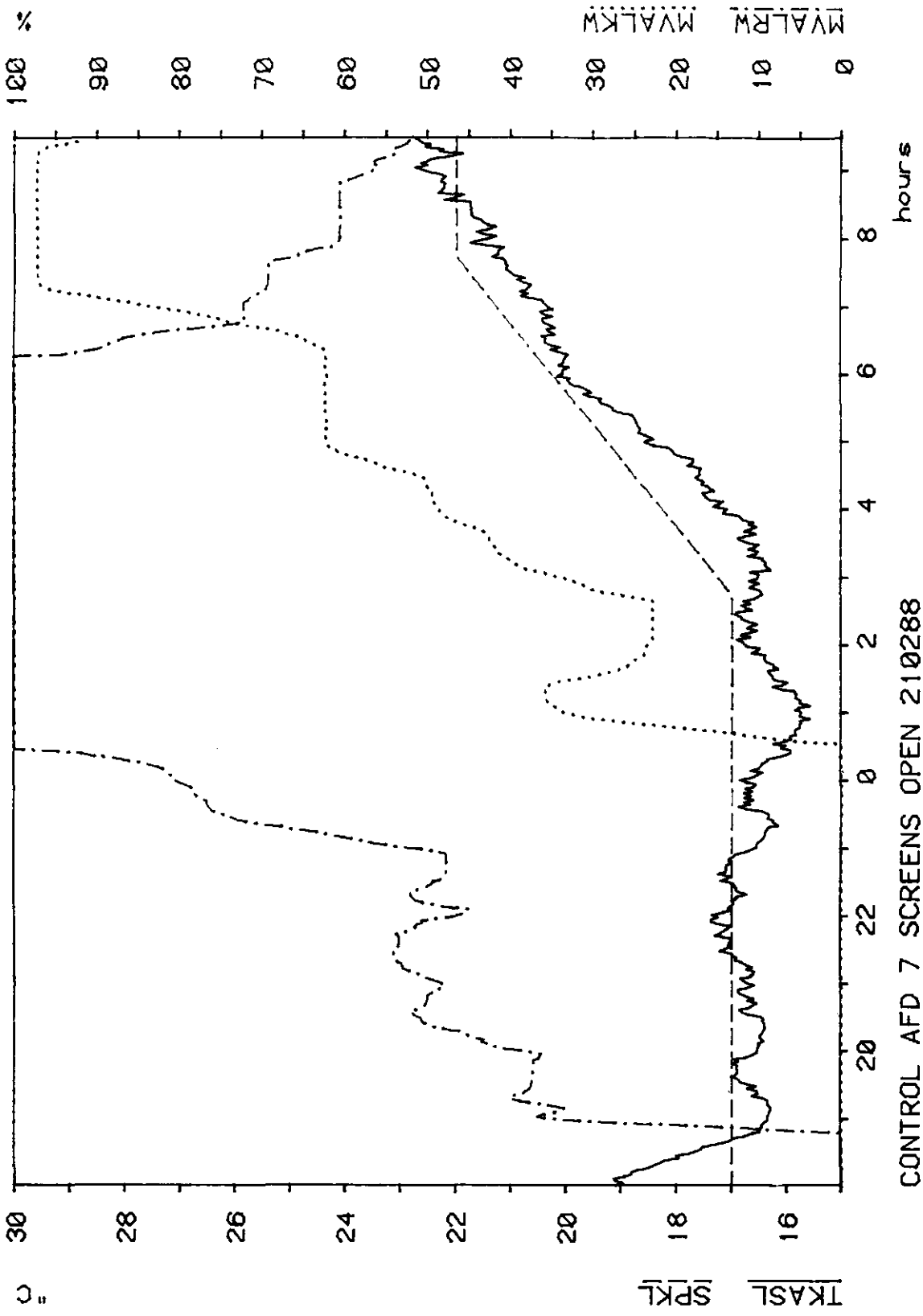


FIG. 7.10



CONTROL AFD 7 SCREENS OPEN 210288  
FIG. 7.11

(klep-AW al gesloten terwijl het systeem een bepaalde afkoeling bezit). In FIG. 7.11 is een meetnacht weergegeven waarbij de gehele nacht de schermen open zijn blijven staan. Hierin is door de grotere warmteoverdrachtscoëfficiënt van de kas (Kkas) duidelijk een grotere beïnvloeding van het buitenklimaat te herkennen (grilliger verloop van TKASL). Onder de optredende buitenomstandigheden ligt het omschakelpunt van de MAST-AW naar de MAST-KW dan ook al voor het opstoken van nacht naar dagsetpoint. De kritische retourtemperatuur waarop het reductie-algorithme zou moeten reageren, is hier verlaagd van 40 oC naar 33 oC. Omstreeks 6:00 uur is door het hoger worden van TKASL deze waarde bereikt. In FIG. 7.11 is dan ook de verlaging van de geleverde AW te herkennen in een verlaging van de AW-klep: MVALRW. De MAST-KW die op dat moment al in bedrijf was, zal om deze verlaging van het AW-net op te vangen hierdoor meer warmte gaan leveren. Het aanspreken van het reductie-algorithme gaat, zoals in FIG. 7.11 is te zien, niet ten koste van de geregelde TKASL. Indien de werkelijk gemeten waarde TKASW wordt vergeleken met de gesimuleerde waarde door het model TKAS (FIG. 7.12), dan valt ook hier bij TKASW een grotere beïnvloeding van het buitenklimaat te herkennen dan bij de gesimuleerde TKAS. Een belangrijke oorzaak is dat het model rekening houdt met de gemiddeld optredende windsnelheid, welke tot uitdrukking wordt gebracht in Kkas. Dit betekent dat indien zich grote fluktuaties in de windsnelheid voordoen, zoals in deze meetnacht het geval was, dit wel in TKASW maar niet in TKAS tot uitdrukking komt. Afgezien van deze beïnvloedingen blijkt ook bij open schermen het model voldoende nauwkeurig het werkelijke signaal te volgen. Ook de gesimuleerde klepstanden in FIG. 7.13 komen goed overeen met de werkelijke waarden volgens FIG. 7.11.

Voor het uittesten van het reductie-algorithme zijn een aantal instellingen van parameters gewijzigd. De kritische retourtemperatuur van het AW-net TCRIT wordt verlaagd tot 33 oC en tevens SPKL gedurende dag en nacht constant gehouden op 18 oC. In FIG. 7.14 is een meetnacht weergegeven met de genoemde gewijzigde instellingen. De schermen zijn gedurende de gehele meetnacht geopend, wat een maximale storingsinvloed van het buitenklimaat tot gevolg heeft. Vanaf 21:00 uur wordt eerst het AW-net opengestuurd. Om even na 23:00 uur is dit net 100 % open, waardoor het KW-net open gaat. Om ongeveer 1:00 uur treedt de overschrijding van de maximale retourtemperatuur (33 oC) op. In het volgorde-diagram van de regeling (FIG. 6.9) is te zien dat parameter SWAT11 door de overschrijding gelijk wordt aan SREDUT. Het uiteindelijke setpoint voor de buistemperatuur van het AW-net SPBMIF wordt dan ook gelijk aan de door het reductie-algorithme berekende waarde SREDUT. Gedurende het verdere verloop van de nacht is de reductie van het AW-net duidelijk te zien; de retourtemperatuur van het AW-net TRETRW (FIG. 7.14) stabiliseert zich rond het gewenste setpoint van 33 oC. De door deze reductie verminderde bijdrage van het AW-net wordt door het KW-net vloeïend overgenomen. Doordat om ongeveer 6:30 uur TRETRW < TCRIT maar het KW-net nog niet is dichtgelopen, blijft het AW-net geregeld door het reductie-algorithme. Op deze wijze wordt steeds zo veel mogelijk alternatieve warmte gebruikt als in verband met de gestelde maximale AW-retourtemperatuur mogelijk is. De hoogte van de maximale retourtemperatuur is vrij instelbaar en heeft geen wezenlijke invloed op de kwaliteit van de regeling. Het AW-net wordt pas weer geregeld door de MAST-AW als de KW-regelklep is dicht-gestuurd. Tenslotte is nog een andere willekeurige meetnacht opgenomen (FIG. 7.15), waarbij de instellingen van parameters gelijk zijn aan die in FIG. 7.14. Om ongeveer 0:00 uur vindt een overschrijding van de ingestelde kritische retourtemperatuur TCRIT = 33 oC plaats. Dit op een moment waarop het AW-net zelfs nog niet volledig is opengestuurd. Het

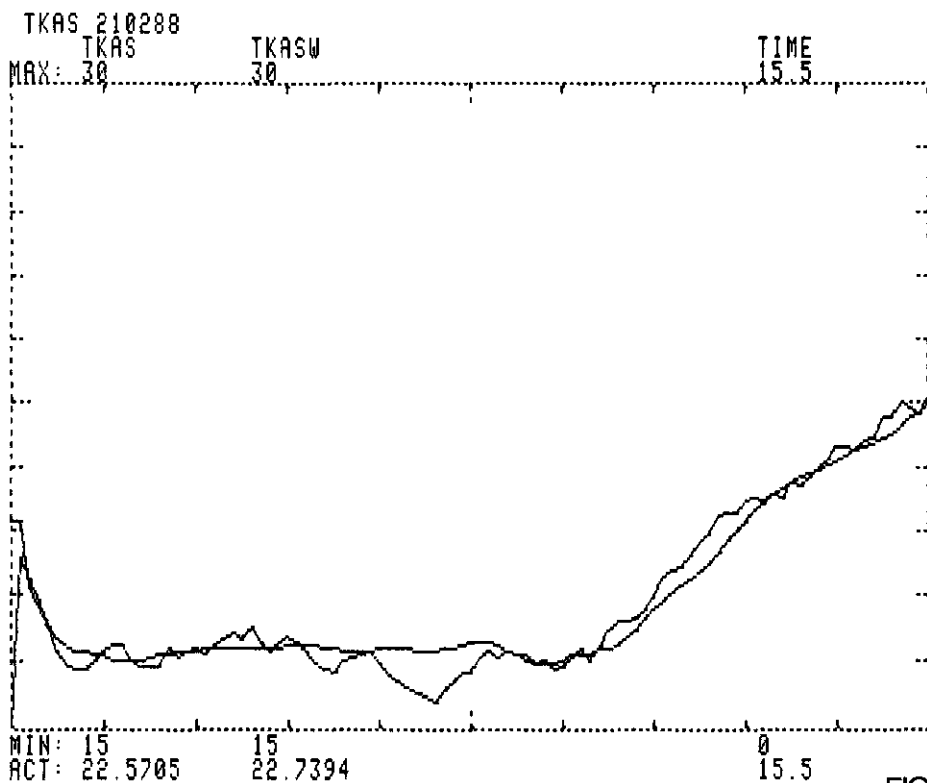


FIG. 7.12

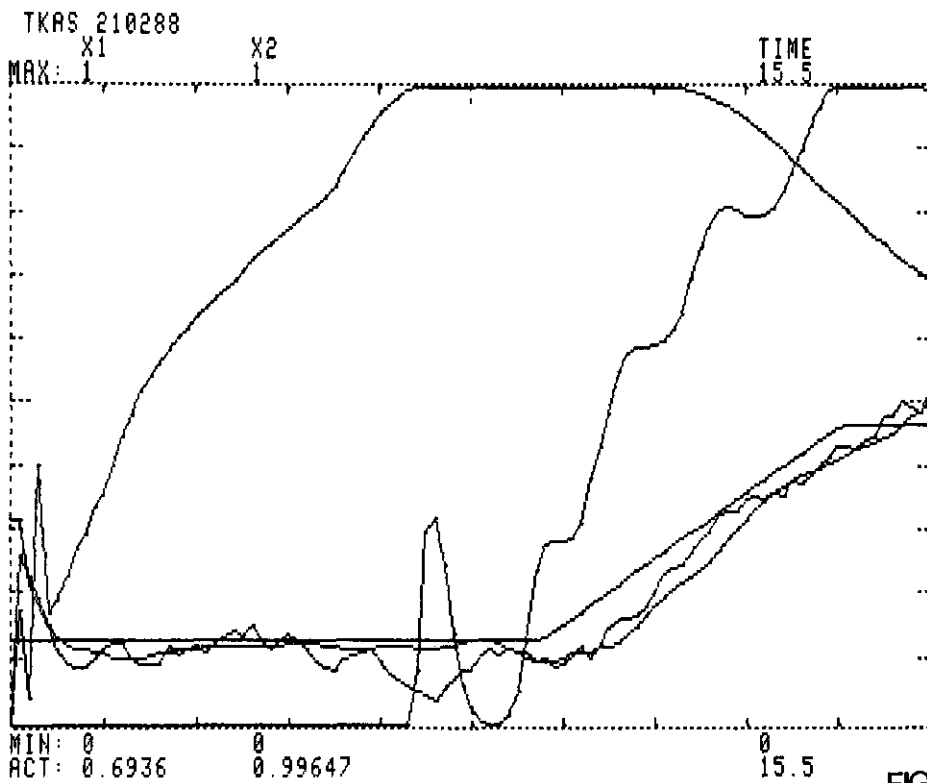
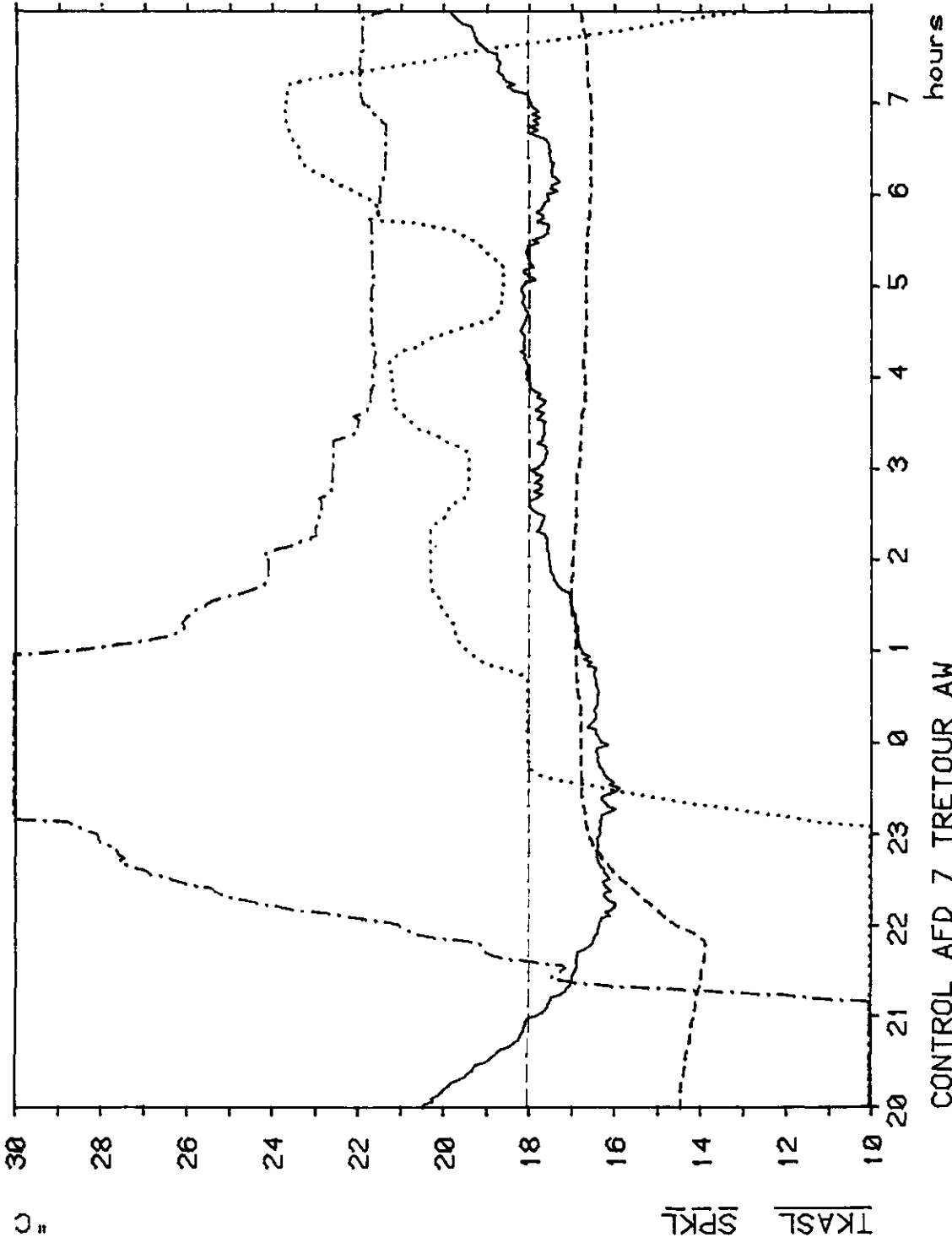


FIG. 7.13

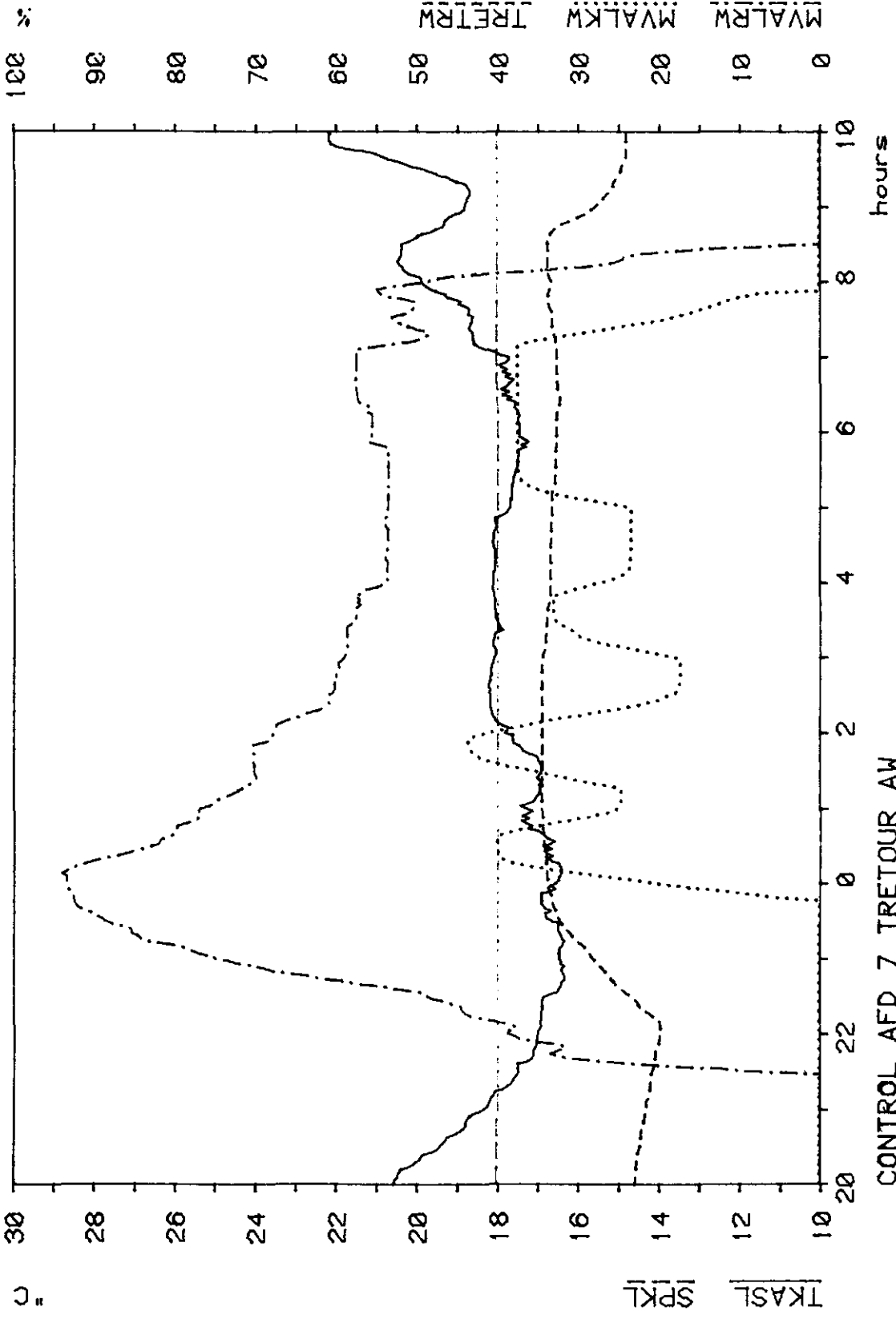


MVALRM MVALKM MVALTRM



CONTROL AFD 7 TRETOUT AW

FIG. 7.14



CONTROL AFD 7 TRETOUTR AW

FIG. 7.15

AW-net wordt in het verdere verloop van de nacht weer geregeld door het reductie-algorithme, terwijl het KW-net de regeling van de luchttemperatuur TKASL overneemt. Doordat de instraling vanaf 7:00 uur toeneemt, treedt een overshoot in de regeling op. Hierdoor wordt het KW-net als eerste dichtgestuurd. Op het moment dat dit net dichtloopt, wordt het reductie-algorithme voor het AW-net afgeschakeld. Tegelijkertijd neemt de MAST-AW de regeling van de luchttemperatuur TKASL over. Doordat het nog steeds te warm is in de kas, wordt ook dit net snel teruggeregeld.

## 8. Conclusies.

-----  
 Conclusies ten aanzien van het regeltechnisch onderzoek zijn kort samengevat als volgt.

- Het is noodzakelijk gebleken ten behoeve van de parametrisering van het model eerst waterzijdig alle debieten te meten en zonodig bij te stellen aan de hand van de geldende ontwerpcondities.
  - Het model blijkt voor het regeltechnisch gedrag een uitstekende weergave van het werkelijk optredende gedrag te zijn, en dus geschikt als hulpmiddel voor de ontwikkeling van het vereiste regelalgorithme.
  - Het "modified" type voor de Master-PI regelaar van het regelalgorithme verdient de voorkeur ten opzichte van het "conventionele" type. In het niet-lineaire gebied van de regeling zal bij toepassing van het "modified" type de regeling sneller uit de verzadiging treden. Bij het gebruik van twee verwarmingssystemen is het opnieuw initialiseren bij toepassing van het "modified" type regelaar veel eenvoudiger dan bij het "conventionele" type.
  - Het testen van het regelalgorithme met behulp van het simulatiemodel heeft plaatsgevonden op zoveel mogelijk belastingssituaties en storingsinvloeden die in een praktische regeling op kunnen treden. Het ontworpen regelalgorithme is universeel toepasbaar voor statisch en dynamisch uiteenlopende pijp-verwarmingssystemen aangesloten op twee verschillende warmtebronnen. De maximale retourtemperatuur van het AW-net kan op een willekeurig in te stellen waarde worden geregeld. Op deze wijze kan in de praktijk tegemoet worden gekomen aan verschillende randvoorwaarden bij toepassing van alternatieve warmtebronnen (warmtepomp, rest- en afvalwarmte, warmte/kracht etc.).
  - Uit de praktijk-evaluatie van het ontworpen regelalgorithme blijkt dat het aan de gestelde eisen voldoet. Indien het model wordt belast met het werkelijk gemeten buitenklimaat, blijken de door het model gegenereerde waarden uitstekend overeen te komen met de praktische waarden. Het regelgedrag van de regeling komt niet in het geding indien de maximale retourtemperatuur van het AW-net kunstmatig wordt verlaagd. Het KW-net neemt soepel de vermindering van de bijdrage van het AW-net over. Dit geeft het regelprogramma een breed toepassingsgebied ten aanzien van de verscheidenheid aan eisen met betrekking tot verschillende vormen van alternatieve warmte. Het gebruik hiervan in de praktijk zou leiden tot een verhoogde bijdrage van alternatieve warmte en dus een vermindering van de aanwezige ketelwarmte.
- Bij implementatie van het regelalgorithme binnen een praktische klimaatcomputer kan de betreffende leverancier gebruik maken van het ontworpen model. Hiermee zou een optimale instelling van het regelproces op een relatief eenvoudige en snelle manier gerealiseerd kunnen worden.

## 9. Literatuur.

- 
- 1 Telle M.G., Kaspers P. en Visser V.J.M., Onderzoek lucht/water warmtepomp in de glastuinbouw, IMAG-rapportnr. 82, 1986.
  - 2 Verwaayen P.W.T. en Meurs van W.T.M., Projectvoorstel voor PEO: Regeltechnisch onderzoek bij het toepassen van twee warmtebronnen voor het verwarmen van kassen, augustus 1986.
  - 3 Knies P., Braak van de N.J. en Breuer J.J.G., Beschrijving onderzoek verwarmen tuinbouwkassen met behulp van rest- en afvalwarmte, intern IMAG-rapport: PR-788-5.
  - 4 Gieling T.H. en Meurs van W.T.M., Specifications for environmental control, The PDP-11 to Mup/Kup interface. Research report 79-5, Institute of Agricultural Engineering.
  - 5 Verwaayen P.W.T., Regeltechnisch onderzoek bij het verwarmen van kassen met behulp van rest- en ketelwarmte, IMAG-rapport nr. 91, oktober 1987.
  - 6 Breuer J.J.G., Jaarbelastingsduurkromme en energiebesparing voor de Nederlandse glastuinbouw, een studie naar relevante invloeden, IMAG-rapport nr. 90, april 1987.
  - 7 Ooster van 't A., Metingen aan en simulatie van het klimaat in een geschermd kas. Doctoraal verslag, Landbouw Universiteit, 1983.
  - 8 Vennegoor op Nijhuis J.A.B., Simulaties met een fysisch kasklimaat-model en een regeltechnisch kasklimaat-model en de vergelijking van deze simulaties. Doctoraal verslag, Landbouw Universiteit, 1986.
  - 9 Bosch van den P.P.J., Discription/manual of the simulationprogram PSI (Interactive Simulation Program). Department of Electrical Engineering, Delft University of Technology, 1984.
  - 10 Udink ten Cate A.J., Modeling and (adaptive) control of greenhouse climates, Dissertatie Landbouw Universiteit Wageningen, 1983.
  - 11 Meurs van W.T.M., The climate control computersystem at the IMAG, Wageningen. Acta Hort. no. 106, 1980, page 77-83.

## 10. Bijlage: Listing van de ontworpen PSI-modellen

SA

Run: SIMULATIEMODEL REGELING + REGELPROCES

- - STRUCTURE AND PARAMETERS PRESENT MODEL - -

Block	Type	Input1	Input2	Input3	Par1	Par2	Par3
0	CON				0.0000E+00		
A10	CON				2.7000E+04		
ALFA1	REL	DELT1	0	ALFA11			
ALFA11	SUM	ALFA1ST	ALFA1CON		3600.	3600.	
ALFA12C	SUM	ALFA1	TROCFI1		1.000	1.000	
ALFA1CON	MUL	Q1CON	DELT1M4/				
ALFA1ST	DIV	QSTR1	DELT1				
ALFA2	REL	DELT2	0	ALFA22			
ALFA22	SUM	ALFA2ST	ALFA2CON		3600.	3600.	
ALFA22C	SUM	ALFA2	TROCFI2		1.000	1.000	
ALFA2CON	MUL	Q2CON	DELT2M4/				
ALFA2ST	DIV	QSTR2	DELT2				
ALFA3	REL	DELTB	ALFABTK	ALFATKB			
ALFABTK	GAI	TKMTB			4.910		
ALFAD	CON				4.6080E+04		
ALFATKB	GAI	TKMTB			2.000		
ALFATOT	SUM	ALFA1	ALFA2	ALFA3	1.000	1.000	1.000
B21	SUB	TBODEM	TBOD2				
B22	SUB	TBOD2	TBOD3				
B23	SUM	B21	B22		1.5358E+05	-9.2160E+04	
B31	SUB	TBOD3	TBOD4				
B32	SUM	B22	B31		9.2160E+04	-1.9188E+04	
B41	SUB	TBOD4	TGROND				
B42	SUM	B31	B41		1.9188E+04	-3960.	
BUITEN	SUM	SINUS	CONST	RUIS	5.000	7.000	20.00
BUITR	SUM	SINUS	CONST	RUIS	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+
CBODEM	CON				2.4300E+05		
CKAS	CON				1.1200E+04		
CON1	CON				0.0000E+00		
CONI	CON				1.000		
CONSCH	CON				0.0000E+00		
CONST	CON				1.000		
CW1	CON				1765.		
CW2	CON				1.0590E+04		
D	CON				0.2000		
DELT1	SUB	TGEM1A	TKASA				
DELT1M2	SQT	DELT1			1.000		
DELT1M4	SQT	DELT1M2			1.000		
DELT1M4/	DIV	DELT1M4	TKASA				
DELT2	SUB	TGEM2A	TKASA				
DELT2M2	SQT	DELT2			1.000		
DELT2M4	SQT	DELT2M2			1.000		
DELT2M4/	DIV	DELT2M4	TKASA				
DELTB	SUB	TKAS	TBODEM				
DELTRE	MUL	KREDU	SCHAKTRE				
DELU(K)	SUM	U'(K)	U"(K)		1.000	1.000	
DL1	CON				5.000		
DL2	CON				5.000		
E(K)	GAI	E-KASL			1.000		
E(K-1)	ZZ1	E(K)			-7.2996E-02	1.000	
E-KASL	SUB	SETPOINT	TKAS				
E-KASLN	BLN	E-KASL			1.000		
E-WATER1	SUB	SP-WAT1	TANV1				
E-WATER2	SUB	SP-WAT2	TANV2				

E/TIJDC1	DIV	ALFA12C	CW1				
E/TIJDC2	DIV	ALFA22C	CW2				
E/TSCH	DIV	EEN	TSCH				
EEN	CON				1.000		
EEN/TB	DIV	NOEK5	CBODEM				
EEN/TP	DIV	NOEK10	CKAS				
EMFI1CIR	SUB	EEN	FI1CIR				
EMFI2CIR	SUB	EEN	FI2CIR				
EMX1	SUB	EEN	X1				
EMX2	SUB	EEN	X2				
EPS1	SUM	KK	KKK		1.000	-1.000	
EPS1B	SUM	KKB	TBODEM		1.000	-1.000	
EPS1TG1	SUM	RR	RRR		1.000	-1.000	
EPS1TG2	SUM	RR2	RRR2		1.000	-1.000	
EPS2	MUL	EPS1	EEN/TP				
EPS2B	MUL	EPS1B	EEN/TB				
EPS2TG1	MUL	E/TIJDC1	EPS1TG1				
EPS2TG2	MUL	E/TIJDC2	EPS1TG2				
ESCHERM	SUM	SCHERMTO	SCHERM		1.000	-1.000	
FACTI	SUB	CONI	VERGI				
FI1CIR	CON				0.3000		
FI2CIR	CON				0.7400		
HALF	CON				0.5000		
HFI	MUL	IB	0				
I1	TIM	TIME			3.3333E-02		
I11	SUM	DL1	U(K-1)	UR(K-1)	1.000	1.000	-1.000
I12	SUM	REL1	I32		1.000	-1.000	
I21	SUM	UR(K-1)	DL1		1.000	-1.000	
I22	GAI	REL1			1.000		
I31	GAI	U(K-1)			1.000		
I32	SUM	DL2	UR(K-1)		1.000	1.000	
IB	MUL	REL	IBMAX				
IBMAX	CON				0.0000E+00		
INJX1A	MUL	X1	EMFI1CIR	KETEL1			
INJX1B	MUL	EMX1	EMFI1CIR	TRET1			
INJX1CIR	MUL	FI1CIR	TRET1				
INJX2A	MUL	X2	EMFI2CIR	KETEL2			
INJX2B	MUL	EMX2	EMFI2CIR	TRET2			
INJX2CIR	MUL	FI2CIR	TRET2				
INSCHERM	MUL	E/TSCH	ESCHERM				
K1	MUL	K10	TGEM1				
K10	DIV	ALFA1	NOEK10				
K2	MUL	K20	TGEM2				
K20	DIV	ALFA2	NOEK10				
K2A	DIV	TROAL1	ALFA12C				
K2A1	DIV	TAL1	ALFA12C				
K3	MUL	K30	BUITEN				
K30	DIV	KKAS	NOEK10				
K3A	DIV	TROAL2	ALFA22C				
K3A1	DIV	TAL2	ALFA22C				
K4	MUL	K40	TBODEM				
K40	DIV	ALFA3	NOEK10				
K5	MUL	K50	TKAS				
K50	DIV	ALFA3	NOEK5				
K6	MUL	K60	TBOD2				
K60	DIV	ALFAD	NOEK5				
KDELU(K)	SUM	KU'(K)	KU''(K)		1.000	1.000	
KDL1	CON				5.000		
KDL2	CON				5.000		
KETEL1	CON				80.00		

KETEL2	CON				86.00		
KI	DIV	HFI	NOEK10				
KI11	SUM	KDL1	KU(K-1)	KUR(K-1)	1.000	1.000	-1.000
KI12	SUM	KREL1	KI32		1.000	-1.000	
KI21	SUM	KUR(K-1)	KDL1		1.000	-1.000	
KI22	GAI	KREL1			1.000		
KI31	GAI	KU(K-1)			1.000		
KI32	SUM	KDL2	KUR(K-1)		1.000	1.000	
KINT	DIV	U1	TI				
KK	SUM	KK1	KK2		1.000	1.000	
KK1	SUM	K1	K2	K3	1.000	1.000	1.000
KK2	SUM	KI	K4		3600.	1.000	
KKAS	SUM	KKAS1	SCHERM		3600.	3600.	
KKAS1	CON				6.500		
KKB	SUM	K5	K6		1.000	1.000	
KKINT	DIV	KU1	TIKW				
KKK	INT	EPS2			21.96	1.000	
KR	CON				5.000		
KRDKW	CON				0.9900		
KREDU	CON				5.0000E-02		
KREL1	REL	KI11	KI21	KI31			
KREL2	REL	KI12	KI22	KI32			
KRKW	CON				3.000		
KASL2	CON				1.500		
KU"(K)	MUL	KKINT	E(K)				
KU'(K)	MUL	KRKW	U"(K)				
KU(K)	SUM	KUR"(K-1)	KDELU(K)		1.000	1.000	
KU(K-1)	ZZ1	KU(K)			50.46	1.000	
KU1	MUL	KRKW	T6AMPLE				
KUR	GAI	TANV2			1.000		
KUR"(K-1)	GAI	KREL2			1.000		
KUR(K-1)	ZZ1	KUR			50.05	1.000	
KWREDU	MUL	SPW2(T-1)	KRDKW				
NENE	CON				0.9900		
NOEK10	SUM	ALFATOT	KKAS		1.000	1.000	
NOEKS	SUM	ALFA3	ALFAD		1.000	1.000	
NOISE	NOI				0.0000E+00	1.000	2.000
PROCENT1	ZZ1	YYY1			48.06	1.000	
PROCENT2	ZZ1	YYY2			46.49	1.000	
Q1CON	CON				127.0		
Q1STR	CON				7.6500E-09		
Q2CON	CON				127.8		
Q2STR	CON				1.0200E-08		
QSTR1	MUL	Q1STR	TGTK1M4				
QSTR2	MUL	Q2STR	TGTK2M4				
A	MUL	K2A1	TKAS				
A1	MUL	K2A	TANV1				
A2	MUL	K3A1	TKAS				
A21	MUL	K3A	TANV2				
REL	REL	SINIT	CON1	SINIT			
REL1	REL	I11	I21	I31			
REL2	REL	I12	I22	I32			
ROCPFI1	CON				6200.		
ROCPFI2	CON				4.6742E+04		
RR	SUM	R1	R		1.000	1.000	
RR2	SUM	R21	R2		1.000	1.000	
RRR	INT	EPS2TG1			30.31	1.000	
RRR2	INT	EPS2TG2			45.71	1.000	
RUIS	INF	NOISE			5.4544E-02	1.000	5.000
SCHAK	SUB	X1(T-1)	NENE				



CHAK1	BLN	SCHAK	X2N	E-KASLN	2.000		
CHAKCRI	BLN	SCHAKTRE	X12TUB		3.000		
CHAKEK	BLN	E-KASLN	X2N	SCHAKCRI	2.000		
CHAKKW	BLN	SCHCRINO	X2	SCHAKNOT	2.000		
CHAKNOT	BLN	SCHAK			1.000		
CHAKO	BLN	SCHAK	SCHAKCRI		3.000		
CHAKTRE	SUB	TRET1	TCRIT				
CHAKX1	BNG	X1			1.000	0.0000E+00	0.9500
CHAKX2	BNG	X2			0.0000E+00	1.000	5.0000E-02
CHCRINO	BLN	SCHAKCRI			1.000		
CHERM	INT	INSCHEM			0.0000E+00	1.000	
CHERMOP	MUL	T4	CONSCH				
CHERM6L	MUL	T5	CONSCH				
CHERMTO	SUM	SCHERMOP	SCHERM6L		1.000	1.000	
ET-BEG	CON				17.00		
ETPD/N	INC	TIMER	CONST	SET-BEG	17.00	0.0000E+00	
ETPOINT	ADD	ETPD/N	STAP				
EN	SIN	TIME			0.2618	-1.571	1.000
ENI	ADD	SIN	VERSI				
ENIT	MUL	SINI	FACTI				
ENUS	SIN	TIME			0.2618	2.618	1.000
EM1	SUM	YY1	PROCENT1		1.000	1.000	
EM2	SUM	YY2	PROCENT2		1.000	1.000	
E-WAT1	REL	SCHAKEK	SP-WAT11	SP-WATRW			
E-WAT10	REL	SCHAKO	SP-WATRW	TANV1			
E-WAT11	REL	SCHAKCRI	SPWAT100	SPREDU			
E-WAT2	REL	SCHAKKW	SP-WAT22	KWREDU			
E-WAT20	REL	SCHAKO	NENE	SP-WATKW			
E-WAT22	REL	SCHAK1	SP-WAT20	TANV2			
E-WATKW	GAI	KU(K)			1.000		
E-WATRW	GAI	U(K)			1.000		
EPREDU	SUB	SPW1(T-1)	DELTRE				
EPW1(T-1)	ZZ1	SP-WAT1			46.67	1.000	
EPW2(T-1)	ZZ1	SP-WAT2			50.46	1.000	
EPWAT100	REL	SCHAK1	SP-WAT10	SP-WATRW			
EPAP	CON				5.000		
EUUR1	GAI	E-WATER1			2.000		
EUUR2	GAI	E-WATER2			1.300		
	BNG	ZAAGTAND			0.0000E+00	0.5000	4.000
	BNG	ZAAGTAND			0.0000E+00	1.500	8.000
	CON				273.0		
	BNG	ZAAGTAND			0.0000E+00	-2.000	17.00
	BNG	ZAAGTAND			0.0000E+00	1.000	7.000
	BNG	ZAAGTAND			0.0000E+00	-1.000	18.00
	SUM	T5	HALF		1.000	1.000	
EL1	GAI	ALFA1			2.000		
EL2	GAI	ALFA2			2.000		
ENV1	SUM	INJX1A	INJX1B	INJX1CIR	1.000	1.000	1.000
ENV2	TDE	TANV2Z			50.14	6.6600E-02	0.0000E+00
ENV2Z	SUM	INJX2A	INJX2B	INJX2CIR	1.000	1.000	1.000
OD2	INT	B23			20.61	2.0600E-05	
OD3	INT	B32			20.38	5.1440E-06	
OD4	INT	B42			19.38	2.5720E-06	
ODEM	INT	EPS2B			20.75	1.000	
ORIT	CON				35.00		
EM1	SUM	TANV1	TRET1		0.5000	0.5000	
EM1A	ADD	TGEM1	T273				
EM1M2	MUL	TGEM1A	TGEM1A				
EM1M4	MUL	TGEM1M2	TGEM1M2				
EM2	SUM	TANV2	TRET2		0.5000	0.5000	

:

TGEM2A	ADD	TGEM2	T273				
TGEM2M2	MUL	TGEM2A	TGEM2A				
TGEM2M4	MUL	TGEM2M2	TGEM2M2				
TGROND	CON				16.00		
TGTK1M4	SUM	TGEM1M4	TKASM4		1.000	-1.000	
TGTK2M4	SUM	TGEM2M4	TKASM4		1.000	-1.000	
TI	CON				0.2000		
TIKW	CON				0.3330		
TIM	TIM	TIME			3.3333E-02		
TIMER	ADD	T1	T2	T3			
TKAS	TDE	KKK			22.05	0.2667	0.0000E+00
TKASA	ADD	TKAS	T273				
TKASM2	MUL	TKASA	TKASA				
TKASM4	MUL	TKASM2	TKASM2				
TKMTB	EXP	DELTB			3600.	0.3333	3.000
TRET1	TDE	RRR			30.55	0.4000	0.0000E+00
TRET1T-1	ZZ1	TRET1			30.57	1.000	
TRET2	TDE	RRR2			45.61	0.2500	0.0000E+00
TRET2T-1	ZZ1	TRET2			45.65	1.000	
TROAL1	SUM	TROCFI1	ALFA1		1.000	-1.000	
TROAL2	SUM	TROCFI2	ALFA2		1.000	-1.000	
TROCFI1	GAI	ROCFI1			2.000		
TROCFI2	GAI	ROCFI2			2.000		
TSAMPLE	CON				3.3333E-02		
TSCH	REL	T6	TSOP	TSSL			
TSOP	CON				0.6660		
TSSL	CON				0.2000		
TWEE	CON				2.000		
U''(K)	SUM	E(K)	E(K-1)		1.000	-1.000	
U''(K)	MUL	KINT	E(K)				
U'(K)	MUL	KR	U''(K)				
U(K)	SUM	UR''(K-1)	DELU(K)		1.000	1.000	
U(K-1)	ZZ1	U(K)			48.79	1.000	
U1	MUL	KR	TSAMPLE				
UR	GAI	TANV1			1.000		
UR''(K-1)	GAI	REL2			1.000		
UR(K-1)	ZZ1	UR			46.69	1.000	
VERSI	CON				-0.2500		
X1	FNG	PROCENT1			0.0000E+00	100.0	-11.00
X1(T-1)	ZZZ	X1			0.4666	9.9999E-02	1.000
X12TUS	BLN	SCHAKX1	SCHAKX2		2.000		
X2	FNG	PROCENT2			0.0000E+00	100.0	-12.00
X2N	BLN	X2			1.000		
YY1	GAI	STUUR1			0.8330		
YY2	GAI	STUUR2			0.8330		
YYY1	LIM	SOM1			0.0000E+00	100.0	1.000
YYY2	LIM	SOM2			0.0000E+00	100.0	1.000
ZAAGTAND	INR	CONST	0		3.3333E-02	1.000	24.00

PSI\*



