



# LUND UNIVERSITY

## Digital reglering av klimatprocesser

Jensen, Lars

1978

*Document Version:*  
Förlagets slutgiltiga version

[Link to publication](#)

*Citation for published version (APA):*  
Jensen, L. (1978). *Digital reglering av klimatprocesser*. [Doktorsavhandling (monografi), Institutionen för reglerteknik]. Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology (LTH).

*Total number of authors:*  
1

### General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

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

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

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117  
221 00 Lund  
+46 46-222 00 00



Lars Jensen



Digital Reglering  
av  
Klimatprocesser

LARS JENSEN

Digital Reglering av Klimatprocesser



Department of Automatic Control • Lund Institute of Technology

# DIGITAL REGLERING AV KLIMATPROCESSER

av

Lars Jensen

Civ ing, Mlm

Akademisk avhandling som för avläggande av teknisk doktorsexamen vid tekniska fakulteten vid universitetet i Lund kommer att offentligen försvaras i sal M:A, Maskinhuset, Lunds Tekniska Högskola, tisdagen den 30 maj 1978 kl 10.15.



Lars Jensen

Digital Reglering  
av  
Klimatprocesser

Dokumentutgivare  
Lund Institute of Technology  
Handläggare Dept of Automatic Control  
Karl Johan Åström  
Författare  
Lars Jensen

Dokumentnamn  
REPORT  
Utgivningsdatum  
May 1978

Dokumentbeteckning  
LUTFD2/(TFRT-1014)/1-263/(1978)  
Ärendebeteckning  
65T6

10T4

## Dokumenttitel och undertitel

Digital reglering av klimatprocesser  
(Digital control of climate processes)

## Referat (sammandrag)

Results from a research project supported by the Swedish Council for Building Research are reported. The main task was to improve climate control technology. The work was focused on digital control. It was split up into three main tasks: model building, design of regulators, and fullscale experiments. Several rooms, airducts, and heat exchangers were modelled. Simple dynamic models have been derived from mass and energy balance equations. The correspondance with experimental models is rather crude. The main problem is to choose certain heat transfer coefficients. Several control experiments showed that the PI-regulator gives a good result in many cases. Adjustment of regulator parameters can be very time consuming. In some cases a solution is to use a self-tuning regulator. A simple self-tuning regulator, called the quotient regulator, has been developed. The computer technology makes it possible to implement better control principles. The experiments show that there is room for improvements of climate control systems and that substantial energy savings can sometimes be obtained. An interpretative process control language suitable for climate control is also described.

## Referat skrivet av

Author

## Förslag till ytterligare nyckelord

44T0

## Klassifikationssystem och -klass(er)

50T0

## Indextermer (ange källa)

Air conditioning, Mathematical models, Experimentation, Temperature control, Humidity control, Computer simulations (Thesaurus of Engineering and Scientific Terms, Engineers Joint Council, N.Y., USA)

## Omfång

263 pages

## Övriga bibliografiska uppgifter

56T2

## Språk

Swedish

## Sekretessuppgifter

60T0

## ISSN

60T4

## ISBN

60T6

## Dokumentet kan erhållas från

Department of Automatic Control  
Lund Institute of Technology  
Box 725, S-220 07 Lund 7, Sweden

## Mottagarens uppgifter

62T4

## Pris

66T0

Digital reglering av klimatprocesser.

Digital control of climate processes.

Avhandling för teknologie doktorsexamen vid Lunds Tekniska Högskola.

Arbetet har understötts av Statens Råd för Byggnadsforskning.

Anslagsnr: 740622-5

Projekttitel: Datorreglering av klimatprocesser.

Till Anita

## INNEHALLSFÖRTECKNING

KAPITEL 1 - INLEDNING	1
KAPITEL 2 - KLIMATPROCESSER	9
1. Störningar	9
2. Krav	12
3. Problem	15
4. Referenser	18
KAPITEL 3 - EXPERIMENTELL UTRUSTNING	21
1. Basutrustning	22
2. Hjälpustrustning	26
3. Programvara	28
4. Sammanfattning	32
5. Referenser	33
KAPITEL 4 - MODELLBYGGE	35
1. Fysikaliska modeller	35
2. Modellstrukturer	45
3. Identifiering av insignal-utsignal-modeller	46
4. Referenser	52
KAPITEL 5 - EXEMPEL PÅ MODELLBYGGE	53
1. Rum med luftinblåsning	55
2. Luftkanal	63
3. Luftvärmare	69
4. Entalpiväxlare	76
5. Bostadsområde utetemperatur - fjärrvärmeeffekt	90
6. Referenser	97
KAPITEL 6 - DIMENSIONERING AV REGULATORER	99
1. Inledning	99
2. Konventionella regulatorer	100
3. Enkla självinställande regulatorer	106
4. Kvotregulatorn	111
5. Datorreglering	146
6. Referenser	152

KAPITEL 7 - EXEMPEL PÅ REGLERING	153
1. Inledning	153
2. Radiatoruppvärmda rum	157
3. Luftvärmda rum	175
4. Reglering av elbatteri med kvotregulator	194
5. Reglering av värmepump med kvotregulator	197
6. Tilluftsreglering med en entalpiväxlare	202
7. Exempel på nya reglerprinciper	210
8. Referenser	221
 KAPITEL 8 - ETT PROCESSTYRNINGSSPRÅK	 223
1. Inledning	223
2. Val av språk	224
3. Språket	228
4. Regulatorsubrutin	239
5. Implementering	245
6. Operatörskommando	247
7. Referenser	249
Appendix A	250
 ENGLISH SUMMARY	 253

## KAPITEL 1

### INLEDNING

Behovet av klimatreglering har ökat kraftigt sedan 1960-talet. Ett av skälen till detta är den ändrade byggtekniken, som innebär lättare konstruktioner med större inre värmebelastning från belysning, maskiner, personer och solinstrålning genom stora fönsterytor. De ökade värmebelastningarna kan klaras av med ett flertal olika klimatsystem. Dessa system kräver någon form av reglering. Ett ökat byggande av stora byggnader, såsom kontorshus, varuhus och sjukhus, har också skett. Storleken på dessa byggnader har också ökat.

Under 1970-talet har kravet på bättre reglering ökat ytterligare på grund av de stigande energipriserna. Anläggningar förses med olika typer av värmeåtervinning, vilket komplicerar klimatsystemen och därmed också reglerutrustningen. Parallellt har reglertekniken övergått från pneumatik till elektronik. Elektroniken har utvecklats från brygg- och reläteknik via rör- och transistorteknik mot integrerade kretsar.

Mångfalden av klimatsystem har medfört att reglersystem utvecklats enligt två riktlinjer: specialiserade reglercentraler för vissa typfall eller en moduluppbyggd reglercentral som kan anpassas till ett givet reglerfall. För vanligt förekommande reglerfall är den specialiserade reglercentralen billigare än den moduluppbyggda. Motsatsen gäller när udda reglerfall skall lösas. Här kan en helt ny fas inledas med datortekniken. Olika reglerfall löses med programvara och moduler används endast för att anpassa yttre komponenter till datorsystemet.

Reglertekniken inom VVS-sektorn har av många betraktats som underutvecklad. Skälet till detta är främst kostnadskraven. Ett reglersystem skall framför allt vara billigt. Tekniska prestanda kommer i andra hand, eftersom regler-tekniska prestanda ej förekommer i byggnormerna och en effektiv kontroll av reglersystemets funktion ej ingår i normala leveransprov. Ekonomiska

prutningar går ofta ut över klimatsystemet. Driftskostnader beaktas heller inte alltid vid val av klimatsystem.

Trimning av reglercentraler är kostsamma, eftersom klimatprocesser är långsamma och det normalt inte finns några hjälpmedel som skrivare o dyl. Detta leder till en strävan att förenkla reglercentralerna så att endast ett minimalt antal injusteringar behöver göras. Här öppnar sig nya möjligheter för datortekniken att automatisera injusteringen av motsvarande regulatorparametrar i regulatoralgoritmer.

I stora byggnadskomplex ökar kravet på att effektivt kunna övervaka och styra alla funktioner, eftersom arbetskostnaden är hög. För detta ändamål finns det ett flertal olika övervaknings- och styrsystem. Även här har det skett en utveckling från reläsystem till system uppbyggda med integrerade komponenter. Under 1970-talet har en övergång skett till mikro- och minidatorbaserade system. I de flesta fall kombineras dessa utrustningar med reglerutrustningar av konventionellt utförande. Nästa steg i utvecklingen är att låta datorn ta över regleringen och ersätta de konventionella regulatorerna.

Ett annat genomgående drag hos reglertekniken inom VVS-sektorn är att det knappast finns någon samordning mellan olika reglerkretsar. En sådan samordning kan vara svår att utföra med konventionell teknik. Om datorer används krävs det kunskap, men endast en obetydlig ökning av programvara.

Datortekniken har hittills använts vid dimensionering av klimatsystem, främst för statiska beräkningar. I vissa fall genomförs också simuleringar av temperaturförloppet i rum. Dessa simuleringar har främst gällt kyl drift sommartid. I samband med energikrisen har även intresset ökat för simulering av snabb uppvärmning av lokaler, som ej används kontinuerligt. Genomgående för dessa simuleringar är att olika byggnadsdelar, såsom golv, väggar och tak, beskrivs väl medan själva klimatsystemet med reglerutrustning oftast förenklas starkt. Här saknas det modeller.



## FORSKNINGSPROJEKT

Utgående från den bakgrund som skisserats ovan startades 1970 ett forskningsprojekt stött av Statens Råd för Byggnadsforskning. Projektets huvuduppgifter var att utveckla processkänedom och teknik för modellbygge samt att genomföra reglerexperiment med klimatprocesser. Projektet inriktades från början på digital reglering. Redan 1970 indikerade prisutvecklingen på datorer att de skulle kunna användas för reglering och övervakning av stora klimatsystem. Tillkomsten av mikrodatorerna har öppnat nya möjligheter att införa digital reglering även i mindre byggnader med ett litet antal reglerkretsar.

## DISPOSITION

Avhandlingen består till största delen av resultat från forskningsarbetet. En mindre del har erhållits i samband med förvärvsarbete med datorsystem för styrning, övervakning och reglering av klimatsystem. I kapitel 2 behandlas olika störningar, krav och problem. I kapitel 3 beskrivs en flyttbar mät- och styrutrustning, som har använts ansluten till en fast dator via telefonnätet eller via kabel. Avhandlingens två huvuddelar är modellbygge, som behandlas i kapitel 4 och 5, och reglering, som behandlas i kapitel 6 och 7. Arbetet har omfattat många experiment med olika komponenter och klimatsystem. Den totala experimenttiden omfattar ungefär 1500 timmar. Avhandlingens huvuddelar kommenteras något utförligare i det följande.

## MODELLBYGGE

I kapitel 4 presenteras de metoder som använts för att erhålla matematiska modeller för klimatprocesser. Först beskrivs olika mekanismer för värmetransport i klimatprocesser. Enkla teoretiska modeller kan sedan erhållas ur mass- och energibalanskvationer. Det visas hur okända eller osäkra modellparametrar kan fastläggas genom mätningar på processen. Fördelen med

modeller baserade på fysikaliska ekvationer är att inverkan av parameterändringar kan undersökas enkelt. I vissa fall kan det vara svårt att avgöra hur komplex en modell behöver vara. En empirisk bestämning av en insignal-utsignal modell med processidentifiering kan approximativt ange hur många ekvationer som skall ingå i den teoretiska modellen.

I kapitel 5 tillämpas de i kapitel 4 beskrivna metoderna för flera vanliga klimatprocesser såsom rum, luftkanaler, värmeväxlare och bostadshus. Enkla teoretiska modeller har tagits fram och jämförts med experimentellt bestämda modeller. Resultaten visar att de enkla teoretiska modellerna stämmer grovt överens med de experimentella. Problemet är att bestämma vissa fysikaliska storheter, t ex värmeövergångstal, tillräckligt noggrant. Resultaten visar också att det är lätt att bestämma experimentella modeller för klimatprocesser genom identifiering. Modellerna är genomgående av första och andra ordningen.

Dynamiken mellan tilluftstemperatur och frånluftstemperatur för ett rum beskrivs t ex väl med en första ordningens modell. Beräknad förstärkning och tidskonstant stämmer väl med experimentella värden om en empirisk formel används. En luftkanal går också att beskriva med en första ordningens process med en direktterm. Här är överensstämmelsen också god. Enkla modeller för värmeväxlare visar att deras dynamik är snabb och att en grov uppskattning är möjlig att göra. En entalpiväxlare modelleras utförligt både statiskt och dynamiskt. Här erhålles en god överensstämmelse mellan teoretiska och experimentella värden.

Sist i kapitel 5 ges ett exempel på att en enkel modell kan användas för prediktion av effektuttaget från fjärrvärmenätet i ett bostadsområde. Den klimatberoende delen av effektuttagen går bra att beskriva med en term proportionell mot differensen mellan ute- och innetemperaturerna, eftersom reglersystemet har en framkoppling från utetemperaturen. Den del som beror på varmvattenuttaget kan beskrivas med en periodisk funktion.

## REGLERING

Analogt med modellbyggnadsdelen beskrivs först de metoder som använts för att dimensionera regulatorer. En korrekt inställd PI-regulator klarar

många reglerfall. Eftersom processernas förstärkning och tidskonstanter varierar med drifttillstånd, kan det dock vara besvärligt att justera regulatorn korrekt. Tyngdpunkten i arbetet har därför varit att undersöka olika enkla självinställande regulatorer. Ett specialfall av en sådan regulator har upptäckts under avhandlingsarbetet. Denna regulator har kallats kvotregulatorn, därför att den statiska förstärkningen skattas som kvoten mellan senaste styrvariabel och senaste mätsignal. Regulatorn kan skrivas som

$$u(t) = u(t-1) y_r / y(t), \quad u(t) > 0, \quad y(t) > 0, \quad y_r > 0. \quad (*)$$

Kvotregulatorn har inget medelfel, ty i stationäritet är  $u(t) = u(t-1)$ , vilket medför att  $y(t) = y_r$ . Kvotregulatorn kan således tolkas som en I-regulator med variabel förstärkning. Kvotregulatorn kan användas för att reglera statiska olinjära processer som beskrivs av

$$y(t+1) = f(u(t)). \quad (**)$$

Kravet för stabilitet är att

$$0 < f'(u) < 2f(u) / u. \quad (***)$$

Kvotregulatorn kan modifieras genom att införa dämpning. Med dämpning kan en större klass av statiska processer regleras. Kvotregulatorn kan också användas för att reglera linjära dynamiska processer. Lokal och global stabilitet visas för vissa typer av överföringsfunktioner. Samplingsintervallet är en viktig dimensioneringsparameter. Det bör väljas så att mer än halva stegsvaret har erhållits efter ett samplingsintervall. Detta kan leda till långa samplingsintervall. Ett kortare samplingsintervall kan användas om dynamisk kompensering, baserad på skattning av en första ordningens modell av processdynamiken, införs.

Val av lämplig reglerprincip är ett annat tema, som behandlas i kapitel 6. Grundtanken är att undvika svåra reglerproblem genom lämpligt val av mätta och reglerade storheter. Även beräknade storheter kan användas. När en dator används för reglering krävs endast lite extra programvara för de nödvändiga beräkningarna. En annan observation är att de i reglerprinciperna ingående storheterna kan vara ytterst informativa jämfört med de primära reglerstorheterna. Typiska exempel är att basera regleringen på en

verkningsgrad i stället för en temperatur eller på vatteninnehållet i stället för den relativa fuktigheten.

I kapitel 7 ges exempel från olika experiment med reglering av klimatprocesser. Genomgående för experimenten är att prov har gjorts utan reglering, med normal reglering och med olika digitala regulatorer. Varje prov har omfattat någon störning eller någon börvärdesändring.

Först ges exempel på reglering av ett elradiatoruppvärmt rum och ett radiatoruppvärmt bostadshus. I det första fallet provades olika regulatorer. Resultaten visade att en viss förbättring kan fås med mer komplicerade regulatorer. De temperaturvariationer som erhöles med en PI-regulator skiljde sig dock inte mycket från de som erhöles med den mest komplicerade regulatorn. Bostadshuset provades med en förbättrad reglering med återkoppling från frånluftstemperaturen. Proven visade att temperaturen kunde regleras avsevärt bättre än med enbart framkoppling. Ur reglerteknisk synpunkt är detta inget märkvärdigt. Ur energibesparingssynpunkt är detta förbättrade reglersätt viktigt, ty den ökade installationskostnaden förräntas på mellan ett och två år. I ett avsnitt ges exempel på reglering av olika ventilerade rum. Olika regulatorer provades på en lektionssal. Resultaten med PI-regulatorn skiljde sig även här inte avgörande från de resultat som erhöles med mer komplicerade regulatorer.

Med ett försöksrum visas hur ren till-från reglering kan förbättras genom att använda en modell i regulatorn. En dead-beat styrlag beräknas utgående från modellen. Styrlagen används för att bestämma om signalen skall vara till eller från.

I en annan försöksserie med ett sjukhusrum provades ett modifierat reglersätt för en eftervärmare. Värmetillskottet i tilluften regleras normalt genom spjällreglering av ett värmebatteri med konstant vattenflöde. Det modifierade reglersättet med ett pulslängdsmodulerat flöde kunde fås att reglera bättre än det normala. Flödesregleringen är också att föredra ur energisynpunkt, då den inte medför några onödiga värmeförluster från värmebatteriet i avstängt tillstånd. En sådan värmeförlust kan leda till ett ökat kylbehov sommartid.

I två fall ges exempel på hur kvotregulatorn kan användas för tilluftsreglering av ett elektriskt värmebatteri och en värmepumpsanläggning, som regleras i åtta steg. Reglering av stegprocesser med en PI-regulator sker med ständig in- och urkoppling av ett steg. Detta inträffar inte med kvotregulatorn. I stället fås ett konstant reglerfel, som varierar med behovet.

I ett avsnitt med en entalpiväxlare används med gott resultat både en ny reglerprincip och en självinställande regulator för att reglera en tilluftstemperatur.

I det sista underavsnittet belyses användning av nya reglerprinciper. Först behandlas reglering av temperatur och fukt. I ett annat fall beräknas det mest ekonomiska driftssättet för en klimatanläggning med flera efterbehandlingsdelar och en gemensam förbehandlingsdel. Reglering av effekt och utgående vattentemperatur för en elpanna beskrivs sist i avsnittet. En förbättrad reglering erhöles genom att beräkna den önskade ingående vattentemperaturen från den önskade effekten och den önskade utgående vattentemperaturen. En parameter, som beskriver vattenflödet, uppdaterades rekursivt ur mätdata.

## FÖRSÖKSTEKNIK

Avsikten med forskningsarbetet var att undersöka olika klimatsystem teoretiskt och experimentellt. Det var inte möjligt att inom forskningsanslagets ram bygga upp speciella laboratorieprocesser. I stället utnyttjades befintliga klimatsystem.

Experimenten kunde genomföras på två sätt, antingen med hjälp av ett portabelt minidatorsystem eller med en mät- och styrutrustning ansluten till institutionens dator. Det senare alternativet valdes av både ekonomiska och praktiska skäl. Detta gav den fördelen att en befintlig dator kunde utnyttjas. Samma dator har också använts vid modellbygge och dimensionering av regulatorer, vilket har underlättat arbetet.

Programvaran har utformats så att experiment med olika regulatorer helt har automatiserats. Detta har gjorts främst därför att klimatprocesser är långsamma. Experimenten tar följaktligen lång tid. Dessutom var datorn lättast tillgänglig på kvällstid. En fördel med att experimentera på kvällar och nätter var att störningar från sol och personer kunde undvikas. En annan fördel med den valda utrustningen var att ingen personal behövde närvara vid själva försöksobjektet. Resor till och från försöksplatsen kunde inskränkas till ett minimum.

#### PROCESSTYRNINGSSPRÅK

För att kunna tillämpa de nya idéer som presenteras i avhandlingen krävs ett effektivt programmeringssätt. Det är knappast möjligt att utnyttja ett generellt standardprogram för att klara av alla typfall, då en sådan lösning leder till ett dåligt utnyttjande av datorns minnesutrymme. I kapitel 8 beskrivs ett processtyrningsspråk som utvecklats för tillämpning av digital reglering. Driftserfarenheterna från ett tiotal datorsystem, där språket använts, är goda. Språket är interpretativt, vilket medför att programmet enkelt kan ändras on-line. En annan fördel är en hög packningstäthet jämfört med andra högnivåspråk såsom ALGOL, BASIC och FORTRAN.

#### TILLERKÄNNANDE

Författaren vill främst tacka professor Karl Johan Åström för hans ovärderliga handledning och aldrig sinande ström av förbättringar och förtydliganden av avhandlingen. Jag vill också rikta ett varmt tack till alla mina arbetskamrater på institutionerna för Reglerteknik och Byggnadskonstruktionslära. De har alltid ställt upp på att diskutera eller lösa olika problem. Ett tack för gott samarbete riktas också till Malmö Allmänna Sjukhus och Ångpanneföreningen för flera givande försöksserier.

Många tack till Marianne Abrahamsson, som skrivit ut allt grundmaterialet, Gudrun Christensen och Eva Dagnegård, som skrivit avhandlingen, samt Britt-Marie Carlsson, som ritat alla figurer.

## KAPITEL 2

### KLIMATPROCESSER

I detta kapitel belyses kortfattat några olika problem och krav inom klimatregleringens område.

#### 1. STÖRNINGAR

En byggnad påverkas av dels yttre och dels inre störningar. Exempel på yttre störningar är uteluftens temperatur, solstrålning och vind. De inre störningarna utgörs av personer, belysning, värmealstrande maskiner och omställningar av driften såsom start-stopp, dagdrift-nattdrift m m.

Uteluften påverkar rumsklimatet dels direkt genom ventilation, ofrivillig ventilation via otätheter i väggar och fönster samt vädring och dels tidsfördröjt via ytterväggar och tak.

I stationärt tillstånd är uppvärmningsbehovet i stort sett proportionellt mot skillnaden mellan ute- och innetemperaturerna. Detta utnyttjas vid temperaturreglering i de flesta flerfamiljshus med vattenburen värme. Framledningstemperaturen till radiatorerna regleras därför efter en viss given kurva och efter utetemperaturen. Regleringen av rumstemperaturen består i detta fall enbart av en framkoppling. Någon återkoppling från rumstemperaturen finns ej och en felaktigt vald reglerkurva leder alltså till variationer i rumstemperaturen. Ett exempel på hur rumstemperaturen kan variera med utetemperaturen ges i FIG 7.8 och FIG 7.9.

En lokal kan tillföras stora effekter genom solstrålning. För ett vertikalt tvåglasfönster är den maximala effekten omkring  $600 \text{ W/m}^2$ . Lokaler med stora fönsterytor och utan solskydd måste därför ventileras om en rimlig

temperatur skall kunna hållas. Tilluften måste kylas. Inblåsningstemperaturen är begränsad nedåt till 12-15 °C (risk för kondens och kallras). Detta begränsar tilluftens kyleffekt och endast luftflödet kan ökas för att öka kyleffekten. Luftflödet begränsas uppåt av gränsen för högsta lufthastighet i vistelsezonen på omkring 0.1 m/s.

Vinden påverkar främst den ofrivilliga ventilationen i en byggnad. Den ofrivilliga ventilationen i en lokal uppskattas till omkring en luftväxling på fem timmar. Vid stora temperaturskillnader inne-ute ökar den ofrivilliga ventilationen på grund av de termiska krafterna. Denna värmeförlust växer alltså kvadratisk med temperaturskillnaden. Värmeövergångstalen vid konvektion ökar med ökande lufthastighet, men detta påverkar endast obetydligt det totala värmemotståndet för t ex en fasadvägg.

En människa kan avge en effekt mellan 60 W och 120 W beroende på aktivitetsgrad. Denna effekt kan endast påverka lokaltemperaturen vid stora personbelastningar, t ex i lektionslokaler.

I många lokaler avger belysningen en högre effekt än den människor avger. God kontorsbelysning, 1000 lux, avger omkring 50 W/m<sup>2</sup>. Större delen av belysningsvärmets bortföres normalt genom att belysningsarmaturen är frånluftsventilerad. Det bortförda belysningsvärmets kan återvinnas och användas vid uppvärmning av byggnaden. I kontor med hög belysningsstandard, 1000-2000 lux, kan uppvärmningsbehovet täckas med belysningsvärmets vid utetemperaturer på ner till -10 °C.

För att belysa relativa storleksordningar av olika störningar i en klimat-anläggning beaktas ett rum med måtten 4 x 5 x 2,5 m. Fasadytan är 10 m<sup>2</sup>, varav 2 m<sup>2</sup> antas vara fönsteryta. Det maximala uppvärmningsbehovet är omkring 500 W (transmission och ventilation). Solinstrålning ger maximalt 1200 W, vilket mer än väl täcker uppvärmningsbehovet. Solvärmens kan tillvaratas med hjälp av en individuell reglering av varje lokal. Uppvärmningsbehovet kan också täckas av några personer och belysning eller någon värmealstrande apparat. En färgtelevisionsapparat avger t ex omkring 200 W.

En jämförelse kan också göras med den kyleffekt, som kan tillföras rummet med hjälp av ventilation. Med fyra luftväxlingar per timme och en undertemperatur



på tio grader på tilluften erhålls kyleffekt på omkring 700 W. Siffrorna visar att solinstrålningen kan ge ett större värmetillskott till en lokal än vad den normala ventilationen kan kyla bort.

Dessa effekter skall också jämföras med rumsluftens värmekapacitet, som för  $50 \text{ m}^3$  är omkring  $60 \text{ kJ/}^\circ\text{C}$ . Om en effekt på 1 kW tillföres enbart luftmassan i rummet, så ökar luftmassans temperatur med  $1^\circ\text{C/min}$ . De stora värmekapaciteterna i golv, tak och väggar, vilka sammantagna kan vara mer än etthundra gånger större än rumsluftens, dämpar dock temperaturförloppet. Det aktuella rummet har en total begränsningsyta på  $85 \text{ m}^2$ . Vid en temperaturskillnad på två grader kan dessa ytor uppta en effekt av 300 W. Kopplingen mellan rumsluften och väggar, golv och tak varierar med temperaturskillnaden, eftersom värmeövergångstalet varierar med temperaturskillnaden. Detta innebär också att om en störning fördubblas, fördubblas inte temperaturavvikelsen, vilket är gynnsamt. En annan gynnsam egenskap med ett rums begränsningsytor är att de svarar för omkring hälften av en människas temperaturupplevelse.

Solstrålning är den svåraste störningen ur reglerteknisk synpunkt, då den kan ge mycket snabba belastningsvariationer orsakade av vandrande slagskuglor och varierande molntäcke. Därtill kommer utelufttemperaturen, som kan ändras några grader under en timme. Vinden torde vara den lättaste störningen.

Andra momentana störningar inträffar vid uppstart av en anläggning eller vid övergång från dag- till nattdrift eller tvärtom. I det senare fallet minskas ofta luftmängden eller används enbart återluft.

## 2. KRAV

### Människans krav

Människan har ett temperaturregleringssystem, som håller kroppstemperaturen omkring  $37^{\circ}\text{C}$ . Beroende på aktivitetsnivå upprätthålles kroppens värmeproduktion genom andning, genom svettning, genom värmeledning till kläder, genom värmestrålning och genom konvektion. Detta system kan klara av mycket olika klimat men det område, i vilket en människa säges vara i termisk komfort, är mycket litet. Bland annat har det visats av Chrenko (1955) att man som bäst kan få 70% av en grupp försökspersoner nöjda med rumsklimatet.

För att kunna definiera begreppet termisk komfort har Fanger (1970) ställt upp en värmebalansekvation för en människa, där sex olika variabler ingår. De är

- aktivitetsnivå värmeproduktion
- klädsel
- rumslufttemperatur
- medelstrålningstemperatur
- luftfuktighet
- lufthastighet

Det finns ett flertal andra faktorer, såsom kroppsbyggnad, ålder, kön, ras och adaption, vilka ej medtagits. Konstanterna i komfortekvationen har bestämts genom regressionsanalys av mätdata från experiment med försökspersoner och med kunskap om fysikaliska förhållanden.

Med hjälp av speciella diagram, där vissa faktorer är konstanta, kan punkten för termisk komfort erhållas. Ett sådant diagram visar att om relativa luftfuktigheten ändras från 20 % till 80 % måste rumslufttemperaturen sänkas från  $26,4^{\circ}\text{C}$  till  $25,0^{\circ}\text{C}$ . Vid högra temperaturer, där svettning svarar för större delen av värmetransporten, blir luftfuktigheten helt avgörande, men detta område ligger långt från det normala rumsklimatet. Den relativa luftfuktigheten har alltså liten betydelse för den termiska komforten.

Undersökningar utförda av Ingelstadt (1956) och Toremalm (1960) visar att

Luftfuktighetens betydelse för luftvägarnas kondition är liten. Detta beror på att inandningsluften vid passage av näsan värms till kroppstemperatur och befuktas nästan till mättnad. Vid utandning återvinner näsan utandningsluftens värme och vatteninnehåll.

Fram till 1970 har man huvudsakligen studerat människan i ett konstant rumsklimat. Rumsklimatreglering kan i en del fall ske med ren tillfrånreglering, varvid t.ex. rumslufttemperaturen varierar periodiskt. En intressant frågeställning är då: Vilka periodtider och amplituder kan en människa tolerera? En annan fråga är: Kan ett periodiskt rumsklimat upplevas mera stimulerande än ett konstant rumsklimat?

Sprague och McNall (1970) har kommit fram till att vid periodiska variationer i lufttemperatur och relativ luftfuktighet ökar den tillåtna amplituden med ökande periodtid. Detta resultat är något förvånande eftersom människans temperaturkänselförmedling ligger på ett djup av 0,2 - 1,0 mm i huden och en viss dämpning borde då erhållas. Andra experiment med varierande rumslufttemperatur har utförts av Wyon m.fl. (1970). Deras experiment visade att den tillåtna temperaturvariationen för en och samma person var större vid normalt arbete än i vila.

Människans krav på rumsklimatet torde kunna sammanfattas till att rumslufttemperaturen ej bör variera mer än  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  och att den relativa luftfuktigheten är utan direkt betydelse. Indirekt är dock den relativa luftfuktigheten av betydelse, eftersom ökad sådan minskar statisk elektricitet och därmed också dammbildning. Krav på rumsklimatet är att strålningen skall vara så lika fördelad som möjligt, eftersom människan är känslig för asymmetri i strålningsfältet. Vidare bör lufthastigheten ej överstiga 0,2 m/sek.

#### Processtekniska krav

Det finns ett flertal tillverkningsprocesser där kraven på rumsklimatet är högre än de människan kräver.

Inom mekanisk industri med höga krav på måttnoggrannhet tillåts lokallufttemperaturen endast variera några tiondels grader. Större avvikelser kan medföra att produktionen måste kasseras. I vissa fall förekommer krav på att den

relativa luftfuktigheten ej får överstiga 50%. Detta för att undvika korrosion av stål och järnytor. Korrosionen kan uppträda även vid lägre värden på den relativa luftfuktigheten, om luften innehåller korrosiva joner. Risken för kondens i en byggnads fasadväggar begränsar också den högsta tillåtna relativa luftfuktigheten i byggnaden. Andra industrier med höga krav på inneklimatet är tryckerier, livsmedelsindustri och farmaceutisk industri.

Förutom krav på luftens temperatur och fuktighet ställs ofta krav på luftens renhet. Uteluften filtreras efter behov. Dammbildning i en byggnad kan minskas genom att hålla en hög relativ luftfuktighet, eftersom luftfuktigheten minskar den statiska elektriciteten och därmed dammbildningen.

### Funktionstekniska krav

Klimatprocesser skall fungera under mycket varierande förhållanden och utan tillsyn under långa tider. Processerna måste därför vara så utformade och utrustade att alla driftsfall och alla fel kan klaras av utan att anläggningen eller dess försörjningsobjekt skadas. För att klara detta krävs säkerhetsautomatik. Några exempel på sådana är frysvakter, flödesvakter, tryckvakter, nivåvakter, överhettningsskydd, minbegränsningsgivare m.fl.

Frysvakten larmar om risk för sönderfrysning av varmlufts batterier. Flödesvakter används för att övervaka att pumpar fungerar. Tryckvakter kan användas för övervakning av filter och fläktar. Min- och maxbegränsningsgivare används främst för att övervaka vissa processvariabler av sekundärt intresse. I vissa driftsfall så kan reglering ske med dessa givare. Vid strömavbrott får anläggningen eller dess försörjningsobjekt ej skadas. Vissa ventiler eller spjäll måste då utrustas med ställmotorer med återgång till önskat läge vid bortfall av nätspänning.

Ett viktigt krav är att slitage på rörliga mekaniska delar, såsom ventiler, spjäll, ställdon m.fl., skall vara så litet som möjligt för att erhålla längsta möjliga livslängd. Detta krav kommer givetvis i motsatsställning till kravet på små regleravvikelser.

Ett annat problem är att erhålla ventiler med lågt eller inget läckage samt

att åstadkomma långvarigt täta packboxar. I anläggningar med både värme och kyla kan en läckande kylventil leda till stora onödiga driftskostnader.

I VVS AMA (1972) finns ett krav på att rumslufttemperaturen får avvika högst  $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$  från den önskade. Detta krav kan jämföras med att årskostnaden för att värma upp ett luftflöde på  $100\,000\text{ m}^3/\text{h}$   $1^{\circ}\text{C}$  är omkring 30 000 kr vid ett pris på 10 öre/kWh.

### 3. PROBLEM

#### Driftproblem

För att en anläggning skall kunna fungera tillfredsställande är det ytterst viktigt att den blir riktigt injusterad. Viktigast är att luft- och vattenflöden blir de önskade. Nästa krav är att alla regulatorer är rätt inställda.

Under drift är det viktigt att anläggningens funktion kontrolleras. En något felaktig givare eller reglercentral kan orsaka stora onödiga energikostnader. På många anläggningar i dag är det omöjligt att enkelt avgöra om driftstillståndet är det önskade. Detta gör det ännu svårare för användaren att direkt avgöra om anläggningen fungerar som den skall.

I en engelsk undersökning, Hasan (1972), påstås t. ex. att hälften av alla fel på pannor, pumpar, fläktar och kyltorn orsakades av dåliga konstruktioner.

#### Dimensioneringsproblem

Bestämning av maximala kyleffekten i luftkonditionerade lokaler är ett svårt dimensioneringsproblem. Beräkningen sker i regel med något datorprogram. Den aktuella lokalen beskrivs med en modell, som sedan simuleras med aktuell indata. Det finns flera olika beräkningsprogram av denna typ. Sådana program används rutinmässigt av leverantörer av klimatanläggningar. I en undersökning utförd av Nevrala m.fl. (1970) och (1972) beräknades kylbehovet för några oli-

ka rum med olika beräkningsprogram. Skillnaden mellan olika program uppgick till  $\pm 20\%$  av medelvärdet. Någon jämförelse med mätningar från ett rum i full skala gjordes ej, och därför är det svårt att bedöma vilket av de använda programmen som var bäst. Undersökningen illustrerar dock svårigheterna med modellbygge för klimatsystem. Resultatet påverkas mycket av valet av olika värmeövergångstal och av solstrålningen genom fönster. Modellens komplexitet är av mindre betydelse. En enkel modell med bara några tillståndsvariabler skiljer sig knappast från en med tio gånger fler tillståndsvariabler.

En anläggning dimensioneras och konstrueras i regel utgående från två extremfall, nämligen vinter och sommar. Hur en anläggning kommer att arbeta under normalfallen beaktas vanligen inte, trots att den normala driften utgör större delen av den totala driftstiden. Det normala driftsområdet är också det viktiga området för reglersystemen. I extremfall skall regleringen bottna (full värme eller full kyla) oberoende av regulatortyp, därför är extremfallen ointressanta ur reglerteknisk synpunkt. I en artikel av Götti (1972) ges en del exempel på hur extremfallsdimensionering leder till dålig driftsekonomi i det normala arbetsområdet.

Ett problem är att välja ventiler så att rätt ventilauktoritet erhålles. En överdimensionerad ventil medför att reglernoggrannheten blir dålig och endast en del av ventilens arbetsområde utnyttjas praktiskt. Om valet av en ventils eller ett spjälls karakteristik görs lämpligt kan olinjäritet i processen elimineras. Den totala processen kan då bli linjär, vilket underlättar regleringen. Som regel är ventilerna för stora, ty det är frestande för konstruktörerna att ta till i överkant för att arbetsområdet säkert skall räcka till.

Beräkning av värmeväxlare för tappvarmvattenberedning är ett annat problem. På grundval av antal och typ av tappstället beräknas ett sannolikt flöde, som endast överstiges med en viss sannolikhet. Vanliga värden är 1/100 och 1/1000.

### Reglertekniska problem

Det finns inga stora svårigheter förknippade med reglering av enstaka kretsar som t.ex. temperatur, luftfuktighet. De svårigheter man träffar på i praktiken hänger samman med variationer i processernas drifttillstånd.

Ett vanligt reglertekniskt fel är att processen pendlar. Detta kan oftast rättas till genom att minska kretsförstärkningen, byta till en långsammare ställmotor eller byta en överdimensionerad ventil. I vissa fall kan komplicerade fall av pendlingar uppkomma genom koppling mellan säkerhetssystem och reglersystem. Ett exempel är när en frysvakt löser ut och stoppar anläggningen och efter återstarten regleras temperaturen ner så snabbt att frysvakten åter löser ut och stoppar anläggningen.

Olämplig placering av givare kan också leda till dålig reglernoggrannhet eller pendlingar. Temperaturgivare efter spjäll och ventiler måste alltid placeras så att tillräcklig blandning åstadkommes, varvid ett representativt medelvärde erhålles. Här finns också en kompromiss mellan dödtid och reglernoggrannhet. Ju längre från en ventil eller ett spjäll en givare är placerad desto bättre blandning erhålles, men gångtiden (dödtiden) ökar.

I många anläggningar påverkas den totala kretsförstärkningen av ingående luft- och vattentemperaturer. Kretsförstärkningen växer som regel med växande temperaturskillnad mellan det värmande och det värmda mediet. Tilluften i en anläggning kan t.ex. värmas upp  $40^{\circ}\text{C}$  vintertid och endast  $10^{\circ}\text{C}$  sommartid. Detta innebär att kretsförstärkningen varierar 4 gånger. En regulator med fixa parametrar måste då injusteras med tanke på vinterfallet, vilket leder till långsam reglering sommartid. Om regulatorn ställs in för sommorfallet, självsvänger systemet på vintern. Det kan således vara motiverat att ändra regulatorinställningen, t.ex. som funktion av temperaturskillnad mellan det värmande och det värmda mediet eller att använda adaptiva regulatorer.

Många reglerproblem beror på att anläggningen varit felaktigt injusterad (luftflöden eller vattenflöden). På samma sätt kan problem med regleringen uppstå genom att ett luftflöde eller vattenflöde ändrats efter det att anläggningen tagits i drift. En halvering av ett luftflöde medför att en elvärmare dubblar sin kapacitet. Detta kan leda till instabilitet vid kontinuerlig reglering och stora temperaturvariationer vid tillfrånreglering. Det är således av stor vikt att reglerutrustningen beaktas vid anläggningens dimensionering.

De väsentliga problem som uppträder vid reglering av enkla kretsar beror således på variationer i processernas egenskaper. Dessa problem kan avhjälpas med regulatorer som kan ändra sin parameterinställning. Sådana regula-

torer behandlas ingående i denna avhandling. Andra reglerproblem kan uppstå i system med flera samverkande klimatprocesser, trots att de enskilda reglerkretsarna är stabila var för sig. Förklaringen är att de olika reglerkretsarna kan vara starkt kopplade till varandra. Reglering av lufttemperatur och relativ luftfuktighet är ett sådant exempel.

Med de tilltagande energipriserna blir det allt viktigare att tillgodose klimatkraven med minsta möjliga energiförbrukning. Resultaten i avhandlingen kan vara till nytta för att behandla frågeställningar såsom:

- Reglering av tilluft och radiatorer i samma rum
- Reglering av olika zoner av en stor lokal
- Reglering med utnyttjande av byggnadens värmekapacitet
- Optimering av drift av värmepumpar
- Optimering av drift av oljevärmare (luft/oljeblandningsförhållande)
- Optimal startreglering

Dessa problem torde bäst lösas genom användning av mini- och mikrodatorer. En sådan lösning ger också en möjlighet att koordinera regleringen med säkerhets- och belysningssystem. Detta är ett första steg för total automation av byggnader.

#### 4. REFERENSER

- Chrenko, F.A. (1955): The Assessment of Subjective Reactions on Heating and Ventilation Research. Journal Instrument Heating and Ventilation Engineers 23:281, 1955.
- Fanger, P.O. (1970): Analysis and Applications in Environmental Engineering. Teknisk Forlag, Copenhagen.
- Götti, P.G. (1972): Der Einfluss von Bauteilen auf die Regelbarkeit von Klimaanlage. SBHL 98-103, Sept. 1972.
- Hasan, A. (1972): The Occurrence of Faults in Heating and Airconditioning Equipment. HVRA Laboratory Report 68, 1972.
- Ingelstedt, S. (1956): Studies on the Conditioning of Air in the Respiratory Tract. Acta Oto-Laryng., Stockholm:suppl. 131, 1956.



Nevrala, D.J., Robbic, J.V., Fitzgerald, D. (1970): A Comparison of Five Digital Computer Programs for Calculating Maximum Air Conditioning Loads. Part I. A simple office block. HVRA Laboratory Report No. 62.

Sprague, C.H., McNall, P.E.J.R. (1970): The Effects of Fluctuating Temperature and Relative Humidity on the Thermal Sensation (Thermal Comfort) of Sedentary Subjects. ASHRAE Transactions, No. 2136.

Toremalm, N-G. (1960): Funktionella rubbningar i andningsvägarna efter tra-  
keotomi. Diss., Lund, 1960.

VVS AMA (1972)

Wyon, D.P., Bruun, N-O., Olesen, S., Kjerulf-Jensen, P., Fanger, P.O. (1970):  
Factors Affecting the Subjective Tolerance of Ambient Temperature Savings.  
Technical University of Denmark. Laboratory of Heating and Air Condition-  
ing - Building Research Climate Laboratory, Lund, Sweden.



## KAPITEL 3

### EXPERIMENTELL UTRUSTNING

De frågor som behandlas i avhandlingen kan ej besvaras utan experiment. Experimenten kan utföras som laboratorieförsök eller genom experiment på verkliga anläggningar. Eftersom omsorgsfulla laboratorieexperiment tidigare genomförts av Profos och Hemmi (1965) bedömdes det vara angeläget att genomföra experiment med verkliga anläggningar. Den experimentella utrustningen måste därför vara mobil för att kunna utföra experiment på olika orter. Utrustningen måste också innehålla en dator för att enkelt medge prov av olika digitala regleralgoritmer. Det finns ej några extrema krav på snabbhet eftersom klimatprocesserna är förhållandevis långsamma. Ett samlingsintervall på en minut räcker för de flesta klimatprocesser. Detta medför att fjärrstyrning med modem och utnyttjande av institutionens dator är en möjlighet.

Följande alternativ övervägdes således:

- A. Portabel minidator med processinterface
- B. Fjärrstyrning med hjälp av portabel mätutrustning ansluten till fast dator.

Fördelen med att ha en portabel minidator är att all utrustning finns på försöksplatsen vilket underlättar start och stopp av experiment och felsökning. Nackdelar är att resor måste ske fram och tillbaka mellan försöksplatsen, att en minidator har en begränsad kapacitet och att ett helt programsystem måste tas fram för minidatorn.

Fördelen med fjärrstyrning är att experimenten kan utföras fjärrmanövrerade och att en redan befintlig medelstor dator med omfattande programvara kan utnyttjas. Nackdelar är att testning kan vara svårare att utföra och att felsökningar försvåras genom att utrustningen finns på två platser.

Jag fastnade för alternativet med fjärrstyrning. Valet påverkades starkt av att det var mycket billigare än ett portabelt datorsystem.

Den utrustning som använts i experimenten beskrivs i detta kapitel. Utrustningen kunde i stor utsträckning baseras på kommersiellt tillgängliga komponenter. Grundstenarna är en minidator, en kommunikationsutrustning "Coupler-controller 2570A" som tillverkas av Hewlett Packard och vanliga modem. Dessa beskrivs kortfattat liksom den hjälputrustning som konstruerats och byggts för anslutning till processen. Blockschemat i FIG 3.1 ger en översikt av de komponenter som ingår i experimentutrustningen.

Vid fjärrstyrning har experimentatorn ej direkt kontakt med processen. Det är därför angeläget att systemet utformas så att försöksledaren hela tiden har god överblick över vad som händer och att han har olika möjligheter att ingripa. Dessa funktioner beror i stort utsträckning på den programvara som användes. Programvaran byggdes upp kring ett befintligt monitorsystem för on-line reglering RSX men avsevärt system- och programmeringsarbete erfordrades för att få ett flexibelt system. Programvaran beskrivs också i detta kapitel. Avslutningsvis ges en sammanfattning av driftserfarenheterna med systemet.

## 1. BASUTRUSTNING

### Datorn

Datorn är en PDP-15 (Digital Equipment Corporation) med ett kärnminne på 32k ord och ett skivminne på 256k ord. Den har flytande räkning i hårdvara och ordlängden är 18 bitar. Kringutrustningen består av tre dectape-enheter för lagring av program och mätdata, bildskärm med kopieringsmöjlighet, en radskrivare och två teletyper.

### Kommunikationslänk

Dataöverföringen mellan dator och försöksutrustningen sker med en hastighet av 110 baud eller 10 ASCII-tecken per sekund. Detta är en låg hastighet, vilket möjliggör att en tvinnad tvåledare kan användas på avstånd upp till några hundra meter. Vid försök inom Tekniska Högskolan, Lund, har befintliga kablar i kulvertar använts. Kabellängden är omkring 600 meter. Ledarnas tvärsnitt är  $1,5 \text{ mm}^2$ . Dessa kablar har använts under 400 timmars försökstid utan några störningar.

Vid försök med fem olika klimatprocesser i Malmö i samarbete med Ångpanneföreningen och Malmö Allmänna Sjukhus har Televerkets låghastighetsmodem (300 baud) med automatsvar använts under 900 timmar.

Modemförbindelsen har visat sig vara mycket pålitlig. Televerket uppger att felfrekvensen är en bit på en miljon bitar. Detta innebär ett felaktigt mätvärde per tiotusen, då ett mätvärde består av omkring ett hundra bitar.

Ett modem med automatsvar möjliggör att uppkoppling av förbindelsen mellan dator och försöksutrustningen kan ske utan att någon behöver vara närvarande vid försöksutrustningen. Detta har varit en klar fördel då de flesta försök har skett nattetid.

Enda problemet med modemförbindelsen inträffade när försök utfördes vid Malmö Östra Sjukhus. Uppringning skedde via Malmö Allmänna Sjukhus telefonväxel. Efter att tre försök hade avbrutits exakt två timmar efter att uppringning hade ägt rum, kom förklaringen att telefonväxeln var utrustad med samtalsbegränsning på två timmar. Detta faktum kände ingen till tidigare.

### Hewlett Packards kommunikationssystem

Kommunikationssystemet, en coupler/controller, HP2570A, är ett system för överföring av information mellan ett antal yttre enheter. Informationsvägarna styrs antingen av ett internt program uppkopplat med en diodmatris eller med utifrån kommande instruktioner från en dator eller en operatör.

Systemet, som skall beskrivas här, består förutom av själva coupler/controller, av interfacekort för time-sharing, för BCD input, för BCD output och för 16 reläer, av en voltmeter, av en scanner och av ett interface för analoga ingångar, analoga utgångar och logiska utgångar. Systemet kan mäta tio temperaturer eller analoga spänningar och kan ställa ut fyra analoga spänningar och fyra reläer eller alternativt 16 reläer. Mer detaljerad information kan fås i Jensen (1973). I FIG 3.1 ges en schematisk bild av systemet.

Hela mätsystemet kan testas med tillhörande teletype på samma sätt som datorn normalt arbetar med mätutrustningen.

En avläsning av ett analogt mätvärde tar 2,6 sekunder. Utställning av en analog eller alla logiska utsignaler tar 0,7 sekunder. Logiska insignaler finns ej. En analog insignal kan i nödfall användas.

Med de givna tidsuppgifterna framgår det att om alla ingångar och utgångar skall användas så tar detta omkring 29 sekunder. Det minsta tänkbara samplingsintervallet blir då i detta fall 30 sek.

Systemet har försetts med fem temperaturgivare för intervallet 15 - 35 °C och fem för intervallet 0 - 100 °C med en beräknad noggrannhet på  $\pm 0,06$  °C resp.  $\pm 0,2$  °C. Temperaturgivarna är termistorer. Beräkningsmetodiken finns utförligt beskriven för det lilla temperaturintervallet i Leden (1973).

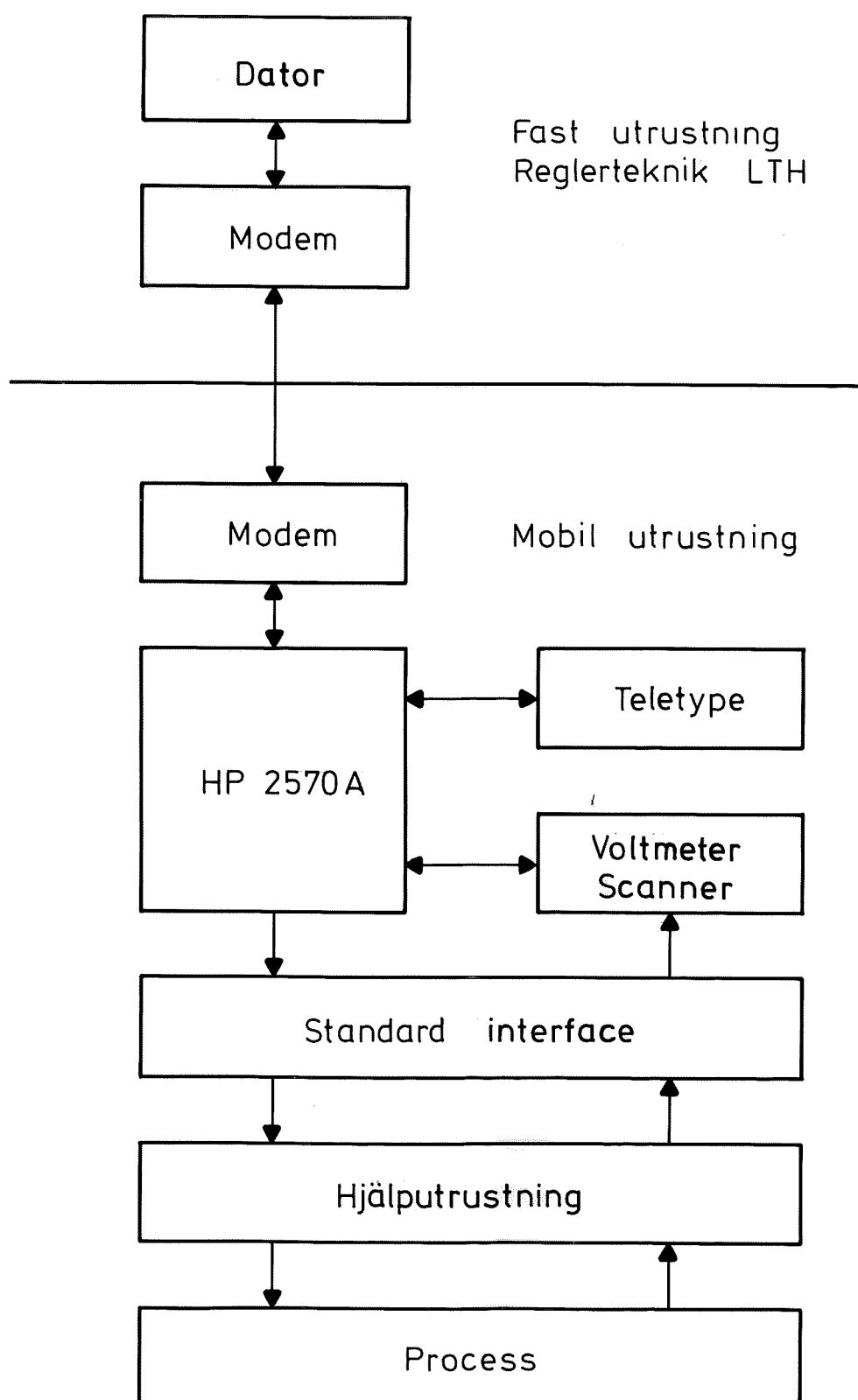


FIG 3.1 - Blockschema för den experimentella utrustningen.

## 2. HJÄLPUTRUSTNING

För att reglera en process är det ofta ej tillräckligt med att kunna mäta och ställa ut analoga och logiska signaler, utan en viss hjälputrustning krävs. Exempel på sådan utrustning, som har byggts, skall ges i detta avsnitt.

### Lägesservo

I samband med experiment på anläggningar i vilka öka/minska ställdon ingick, så skulle ställdonens läge styras och regleras. Ett lägesservo måste byggas för att kunna klara av detta.

Lägesservots uppgift är att köra en elektrisk ställmotor så att det uppmätta läget sammanfaller med det önskade läget, som är en analog utsignal. Beroende på felets storlek och tecken körs ställmotorn framåt eller bakåt tills felet blivit tillräckligt litet. Motorn går med konstant varvtal och påverkar läget genom en växellåda via en hävarm eller kuggstång.

Då det inte är möjligt att stoppa motorn exakt när felet är noll, måste en viss avvikelse tolereras. Detta kan åstadkommas genom att använda ett relä med dödzon. Detta är emellertid ej tillräckligt då felsignalen kan påverkas av störningar, vilket medför att upprepade start och stopp kan ske. Själva starten eller stoppet av ställmotorn ger upphov till störningar. Genom att införa hysteres, så förhindras upprepade start och stopp på grund av störningar. Ett lämpligt val av hysteresens storlek är att sätta den till halva dödزونen. Dödزونens storlek valdes med hänsyn tagen till att lägespotentiometern var trådlindad, vilket medförde att lägessignalen gjorde små språng.

En annan lösning på lägesservoproblemet är att låta datorn mäta läget och därefter köra ställmotorn framåt eller bakåt. Detta kan ske på två sätt. Det ena är att pulslängdsmodulera signalen till ställmotorn, dvs motorn körs framåt eller bakåt under ett tidsintervall proportionellt mot felet. Denna metod har också använts.

Det andra och ännu enklare sättet är att datorn kör ställmotorn framåt



eller bakåt tills felet blivit tillräckligt litet. Denna metod kräver att fördröjningen mellan mätning av läget och stopp av motorn är litet i förhållande till den totala gångtiden. För coupler/controller systemet är fördröjningen omkring 3 sek. Detta skall jämföras med en normal gångtid på 100 sekunder för en ställmotor. Denna metod har ej använts.

### Linjäriseringskrets till varvtalsservo

I samband med experiment med en entalpiväxlare skulle varvtal styras och regleras. Den normala reglerutrustningen skulle användas så långt det var möjligt. Reglercentralen för tilluftstemperaturreglering påverkade en ställmotor vars potentiometer i sin tur påverkade motordriften och därmed varvtalet.

Varvtalsservots uppgift är att jämföra det uppmätta varvtalet med det önskade varvtalet, vilket är en analog utsignal, och att öka eller minska pådraget så att önskat varvtal erhålls. Enkla beräkningar och simuleringar visade att det ej var möjligt att låta felet påverka pådraget via ett relä med dödzon och hysteres. Detta berodde främst på ställmotorns gånghastighet. Beräkningar indikerade också att om förstärkning i det öppna systemet kunde minskas så skulle dödزونen kunna minskas. Ett sätt att göra detta är att pulslängdsmodulera lägessignalen till pådragets ställmotor. Detta innebär att ställmotorn till pådraget körs i proportion till felet, en viss periodtid och ett visst maximifel. Pulslängdsmoduleringen åstadkoms genom att jämföra varvtalfelets belopp med en triangelvåg. När felsignalen är större än triangelvågen körs ställmotor - annars inte. Rörelseriktningen avgörs av felsignalens tecken. Triangelvågens minsta värde bestämmer dödزونens storlek. Triangelvågens största värde bestämmer när pulslängdsmoduleringen upphör och ställmotorn körs konstant.

Periodtiden valdes till 2 sek., vilket är mindre än rotnors uppskattade tidskonstant på omkring 5 sek. Med denna linjäriseringskrets kunde dödزونen minskas ner till 1% av maximala varvtalet.

### Varvtalsgivare

För att mäta varvtalet på en entalpiväxlares motor användes en tachogenerator. Denna kopplades till drivmotorns axel via en kugghjulstransmission. Denna kunde anpassas så att varvtalssignalen i volt ungefär motsvarade antalet varv per minut. Då signalen från tachogeneratoren är behäftad med störningar, filtrerades den med ett enkelt RC-filter. Tidskonstanten valdes till 0,5 sekunder för att inte försämra varvtalsservots uppförande nämnvärt. När däremot datorn själv tidstyrde pådraget, filtrerades varvtalssignalen med ett filter med en tidskonstant på 10 sekunder. Detta gjordes för att mäta ett medelvärde och ej mindre varvtalsvariationer beroende på friktion och obalans i rotern.

### 3. PROGRAMVARA

Programvaran har utformats så att reglerförsök med olika regulatorer har kunnat utföras automatiskt. Det finns flera skäl till detta. Dynamiken för klimatprocesser ligger i tidsområdet några minuter till ett tiotal minuter. Detta innebär att ett reglerförsök kan ta flera timmar i anspråk. Någon manuell övervakning är då knappast givande. Samtidigt är klimatprocesser ganska ofarliga även om de handhas på ett felaktigt sätt. De kan alltså lämnas utan någon övervakning en längre tid.

Ett tredje skäl är att den aktuella datorn i regel är fullt utnyttjad på dagen men ej under natten.

Vidare när jämförande försök görs är det ofta av intresse att eliminera olika okontrollerbara störkällor som till exempel personer och solstrålning. Detta kan ske genom att utföra försök nattetid.

Vid byte av regulator måste ibland ett flertal parametrar ändras samtidigt i ett visst tidsintervall, vilket kan vara svårt att hinna med manuellt.

Med automatiserade experiment kan alltså den obekväma arbetstiden på natten utnyttjas väl och utan olägenhet, samtidigt som den är lämplig att använda vid jämförande försök.

För att använda datorn i reell tid finns ett reelltidssystem benämnt RSX plus. I detta system kan flera program vara aktiva samtidigt. Exekvering sker efter prioritet. En användare kan utnyttja fyra olika stora kärnminnesareor för att exekvera sina egna program i. Detta programsystem har köpts av datortillverkaren.

I de följande avsnitten ges en kortfattad beskrivning av alla de användarprogram som har skrivits för att utföra experimenten. En utförligare beskrivning finns i Jensen (1974).

Programmeringen har huvudsakligen skett i FORTRAN IV. Endast ett fåtal rutiner har skrivits i assembler. Skälet har då varit att få korta program.

#### Processkommunikationsprogram

I kärnminnet finns en databas som definierar det antal analoga in- och utgångar som skall mätas respektive ställas ut. Detta görs av ett program som exekveras varje samplingsintervall. Först mäts alla ingångar och därefter väntar programmet tills att regulatorprogrammet har beräknat alla nya analoga och logiska utsignaler, som är insignaler till reglerobjektet.

Databasen i kärnminnet innehåller även alla de senaste värdena på de analoga ingångarna och de analoga och logiska utgångarna. Databasen kan enkelt skrivas ut på bildskärmen eller på radskrivare.

#### Reglerprogram

I en databas på disken finns all den information om alla regulatorer som skall exekveras. Databasen kan ändras från operatörsteletypen, skrivas ut på bildskärm eller radskrivare och överförs mellan disk och dectape i båda riktningarna. Regulatorprogrammet kan beräkna högst fem regulatorer, som kan vara digitala PID-regulatorer, z-transformer eller en kombination av båda. Upp till fem gamla in- och utsignaler kan ingå i regulatorerna. Mät-signalerna skalas och deras storlek och ändringshastighet kontrolleras också. Vid fel ersätts mätvärdet med det föregående.

### Styrningsprogram

Även i detta fall definieras försöksbetingelserna av en databas på disken. Denna databas kan behandlas på samma sätt som regulatorbasen. Upp till femton olika parametrar kan ändras till sju olika värden oberoende av varandra i tiden. De parametrar som kan ändras är alla de i regulatordatabasen ingående parametrarna. Detta medför att regulatorparametrar, börvärden, analog och logiska utsignaler kan ändras till önskade värden när så önskas.

Efter det att en parameter antagit alla sina önskade värden börjar sekvensen om igen med första värdet, dvs parameterändringarna är periodiska. Ett stort antal parameterkombinationer kan lätt testas genom att välja perioderna för de olika parametrarna så att de är lämpliga multipler av varandra.

### Datainsamling

De hittills beskrivna programgrupperna räcker till för att utföra försök. För att kunna analysera försöksdata samtidigt, genast efter eller vid ett senare tillfälle, måste mätdata sparas på något sätt. Detta sker i två steg. Först lagras alla önskade mätdata på disken. Här kan nu bearbetning ske. Om data skall bearbetas senare kan mätdata överföras till dectape. För kontroll kan också mätdata skrivas ut på en radskrivare.

### Plottning

Ett enkelt sätt att få en god uppfattning om hur försök fortlöper är att rita upp processvariabler som funktion av tiden. För detta ändamål finns det ett program som kan rita upp till fyra valfria processvariabler, som lagras på disken. Ett exempel på en sådan bild finns i FIG 3.2. Kurvritningen kan också ske samtidigt som mätdata samlas in. Denna metodik har visat sig vara mycket värdefull vid fjärrexperimenten där experimentledaren är långt borta från processen.

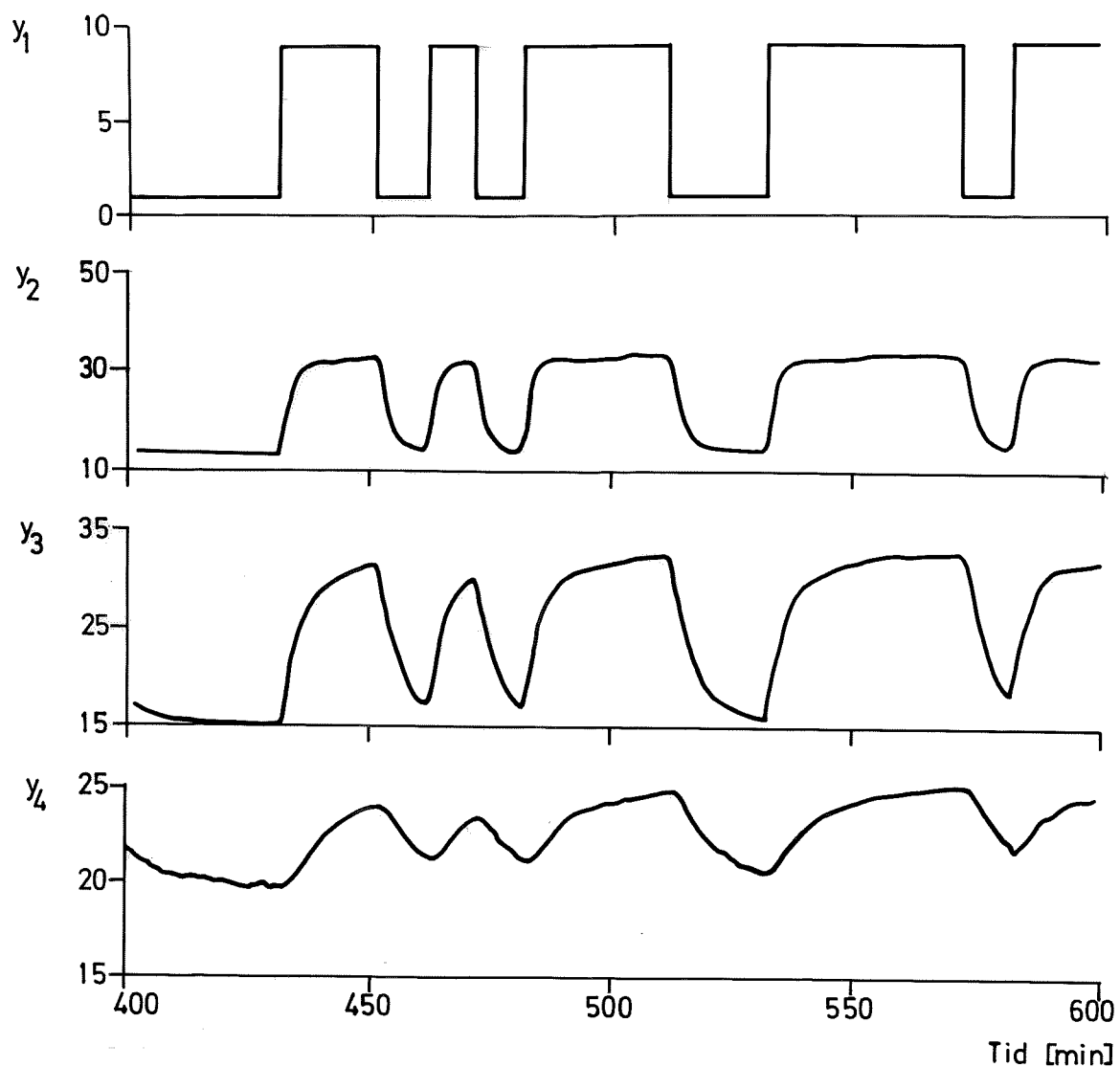


FIG 3.2 - Exempel på kopia av en bildskärm med uppritade processvariabler från ett experiment med lektionssal. Dessa är: ventilläget  $y_1$ , lufttemperatur efter värmebatteri  $y_2$  (före luftkanal), lufttemperatur efter luftkanal  $y_3$  (före lokal) och lufttemperatur efter lokal  $y_4$ . Skala 1:2.

## 4. SAMMANFATTNING

Experimentutrustningen har använts vid ett flertal försöksserier som har omfattat omkring 1500 timmar. Nedan återges en sammanställning av dessa försöksserier.

<u>Plats</u>	<u>Klimatprocess</u>
Lund	Rum med elradiatorer
Malmö	Luftkonditionerad lektionssal
"	Entalpiväxlare
"	Sjukhusrum med eftervärmare
Lund	Försöksrum 1 med konvektiv uppvärmning
"	Försöksrum 2 " " "
Malmö	Tilluftsreglering med värmepump
Lund	Optimering av oljebrännare
"	Undersökning av optimal start
Malmö	Undersökning av frånluftsreglering av ett flerfamiljshus

Erfarenheterna från dessa försöksserier har tillämpats vid utformning och drifttagning av datorstyrda klimatanläggningar. Några av dessa är

Ferrosan	fabriksbyggnad	Malmö
IBM	klimatkammare	Järfälla
ASG	storterminal	Malmö
Blackstone	vindtunnel	Mjällby
SCG	kontorsbyggnad	Danderyd
SIB	laboratorium	Gävle
Metropol	hotell	Berlin

Det har varit lätt att arbeta med utrustningen. Den har varit tillräckligt flexibel för att lätt kunna anpassas till olika typer av processer. Drifts- erfarenheterna har varit mycket goda. Det har också visat sig vara lätt att lära andra t.ex. examensarbetare att arbeta med utrustningen. Andra erfarenheter kan sammanfattas med följande punkter:

- o Fjärrmättekniken sparar arbetstid genom att mindre antal resor krävs.
- o Endast en liten del av utrustningen på försöksplatsen. En och samma huvudarbetsplats med programmerare och servicepersonal ger tillförlitlighet.
- o Modemförbindelsen är ytterst pålitlig och felfri.
- o Fjärrmättekniken möjliggör också att experimentet kan följas upp i reell tid jämfört med konventionell dataloggerutrustning. Ett experiment kan avbrytas så snart ett fel avslöjas.
- o Utan de interaktiva programpaketen hade det inte varit möjligt att genomföra det stora antalet försöksserier. Något som underlättade arbetet var att dessa programpaket fanns tillgängliga på samma dator, som alla experimenten utfördes på. Inga problem med att överföra data från en dator till en annan.

## 5. REFERENSER

Digital Equipment Corporation (1972): RSX plus. Real Time Executive Reference Manual. No. DEC-15-IRSXA-A-D, Maynard.

Hewlett Packard (1971): Coupler/Controller Model 2570A. Operating and Service Manual. HP part No. 02570-90003.

Jensen, L.H. (1973): Ett coupler/controller system, IBR, LTH, AR 1973:6.

Jensen, L.H. (1974): Computer Programs for Fullscale Experiments. DBSAC, LIT, WR 1974:13.

Leden, B. (1973): Linear Thermistor Networks for Temperature Measurements. DAC, LIT, 1973.

Profos, P., Hemmi, P. (1965): Untersuchungen zur Dynamik der Klimaregelung. Neue Technik, 1965.





## KAPITEL 4

### MODELLBYGGE

Ett huvudresultat i denna avhandling är att klimatsystems reglertekniska egenskaper kan beskrivas med enkla modeller. Denna slutsats har baserats på experimentella undersökningar och teoretiska analyser av processerna. I detta kapitel ges en sammanställning av de metoder som använts för modellbygget. Först diskuteras hur modeller kan erhållas ur kända fysikaliska principer. Undersökning av enkla exempel visar de svårigheter som är förenade med bestämning av parametrar i de fysikaliska modellerna. Speciellt är värmeövergångstalen osäkra. Därefter diskuteras metoder för att experimentellt bestämma externa modeller av dynamiska system. Slutligen presenteras metoder för att bestämma interna modeller av dynamiska system genom en kombination av teori och experiment. De metoder som presenteras är tidigare kända. Tillämpningen på klimatsystem är dock ny liksom vissa detaljer, t.ex. observationen att det är naturligt att arbeta med modeller där tillståndsvektorns derivator ej är explicit lösta.

#### 1. FYSIKALISKA MODELLER

De fysikaliska modellerna erhålls på vanligt sätt ur massbalanser, rörelsemängdsbalanser och energibalanser. Eftersom värmeöverföring är den vanligaste fysikaliska processen så används ofta energibalansen. För att ställa upp denna behövs kunskap om de olika värmeöverföringsmekanismerna. För att möjliggöra en kvalitativ bedömning av de fysikaliska modellerna ges därför en sammanfattning av de viktigaste processerna.

### Konvektion

Värmeöverföring mellan en fix yta och en vätska eller gas i rörelse brukar sammanfattas med begreppet konvektion. Värmeöverföringen  $q$  vid stationära förhållanden beror förutom på temperaturskillnaden  $T$  på många faktorer bland annat geometrin, rörelsens utseende och vilket medium det gäller. Värmeövergångstalet  $h = q/\Delta T$  brukar användas för att kvantifiera dessa faktorer. För ytan i ett rum med luft anger Adamson (1974)

$$h = k(\Delta T)^{1/n} \quad (4.1)$$

där  $n$  är 3 eller 4 och  $k$  varierar mellan  $0,6$  och  $2,7 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$  för egenkonvektion och upp till  $100 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$  för påtvingad konvektion. För vatten är värmeövergångstalet  $h$  mellan  $200$  och  $5000 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ . De angivna värdena är experimentella och de visar svårigheten att bestämma  $h$ .

### Strålning

Strålningsutbytet mellan två svarta kroppar ges av

$$q = A_1 F_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

I de tillämpningar som är aktuella t.ex. strålningsutbytet mellan en vägg i ett rum och en person i rummet är temperaturskillnaderna normalt så små att uttrycket ovan kan linjäriseras. Vi får då

$$q \approx k(T_1 - T_2) \quad (4.2)$$

Absorbtionen varierar för olika ytor speciellt för kortvägig strålning (sol-ljus). Andra svårigheter är behandlingen av solstrålningen genom fönsterpartier. Mindre fel kan leda till stora fel i rumstemperatur och kylbehov.

## Strömning

Strömning av vatten i rör eller luft i kanaler är en vanlig mekanism för värmetransport. Strömningshastigheten är i regel så hög att strömningen kan betraktas som turbulent. Strömningen kan då approximeras som en ren tidsfördröjning. Dessutom sker värmeutbyte mellan det strömmande mediet och väggarna. Detta medför att temperaturvariationer dämpas. Profos och Hemmi (1965) har tagit fram överföringsfunktionen mellan ingående och utgående temperatur vid förenklade antaganden.

En värmebalans för mediet i kanalen ger följande differentialekvation

$$\frac{\partial x}{\partial t} = -v \frac{\partial x}{\partial z} + \frac{2h}{\rho_1 c_1 r} (y - x) \quad (4.3)$$

där temperaturen för mediet i kanalen har betecknats med  $x$  och kanalväggens temperatur med  $y$ . Vidare är  $t$  tiden och  $z$  en koordinat som anger läget längs kanalen.

Det strömmande mediets materialdata är densiteten  $\rho_1$  och värmekapacitet  $c_1$  och dess hastighet är  $v$ . Kanalens radie är  $r$  och längd är  $\ell$ . Värmeövergångstalet mellan vägg och strömmande mediet är  $h$ .

Det följer av (4.3) att överföringsfunktionen mellan inlopps- och utloppstemperatur ges av

$$G(s) = e^{-s\ell/v} e^{-a(1 - G_V(s))} \quad (4.4)$$

där

$$a = \frac{2h\ell}{\rho_1 c_1 r v} \quad (4.5)$$

Här är  $G_V(s)$  överföringsfunktionen mellan väggyttemperatur och väggens mass-temperatur. För en tunn vägg, som är idealt isolerad på ena sidan, gäller att

$$G_V(s) = \frac{1}{(sT+1)} \quad (4.6)$$

där

$$T = \frac{\rho_2 c_2 d}{h} \quad (4.7)$$

Väggens materialdata är  $\rho_2$  och  $c_2$  och dess tjocklek är  $d$ .

Överföringsfunktionen (4.4) är ganska komplicerad. Den kan dock approximeras som

$$G(s) \approx e^{-sT_d} \frac{1 + e^{-a} sT}{1 + sT} \quad (4.8)$$

Förenklat kan således temperaturtransmission hos en kanal beskrivas med ett lag-nät med en lågfrekvensförstärkning på 1 och högfrekvensförstärkning på

$$K = e^{-a}, \quad a = \frac{2h\ell}{\rho_1 c_1 r v} \quad (4.9)$$

en tidsfördröjning

$$T_d = \ell/v \quad (4.10)$$

och en tidskonstant

$$T = \frac{\rho_2 c_2 d}{h} \quad (4.11)$$

En uppfattning om storleksordningarna för en luftkanal och ett vattenrör, som ingår i de flesta klimatprocesser, fås i de följande exemplen.

Exempel 4.1 - Vattenrör. Betrakta ett vattenrör med följande data

rörlängd	$\ell$ 20 m
rörradie	$r$ 0,025 m
rörtjocklek	$d$ 0,0025 m
vattenhastighet	$v$ 1 m/sek
densitet vatten	$\rho_1$ 1000 kg/m <sup>3</sup>
värmekapacitet vatten	$c_1$ 4190 J/kg <sup>0</sup> C
densitet rörvägg	$\rho_2$ 7800 kg/m <sup>3</sup>
värmekapacitet rörvägg	$c_2$ 500 J/kg <sup>0</sup> C
värmeövergångstal	$h$ 2500 W/m <sup>2</sup> °C

Det följer av formlerna (4.9 - 4.11) att högfrekvensförstärkningen är 0,38, tidsfördröjningen är 20s, och tidskonstanten är 4s.

□

Siffervärdena ovan visar att dynamiken för ett vattenrör är ytterst snabb. Förstärkningen minskar endast till 0,87 för frekvenser motsvarande en periodtid på en minut. Färförskjutningen blir 13<sup>0</sup> för dynamikdelen och 120<sup>0</sup> för transportfördröjningen.

Exempel 4.2 - Luftkanal.

kanallängd	$\ell$ 20 m
kanalradie	$r$ 0,2 m
kanalgodstjocklek	$d$ 1 mm
lufthastighet	$v$ 5 m/sek
luftens densitet	$\rho_1$ 1,2 kg/m <sup>3</sup>
luftens värmekapacitet	$c_1$ 1 kJ/kg <sup>0</sup> C
plåtens densitet	$\rho_2$ 7800 kg/m <sup>3</sup>
plåtens värmekapacitet	$c_2$ 500 J/kg <sup>0</sup> C
värmeövergångstal	$h$ 50 W/m <sup>2</sup> °C

Högfrekvensförstärkningen är 0,19, tidsfördröjningen är 4s och tidskonstanten är 80s. En sinussignal med periodtiden 1 min minskar amplituden med en faktor 0,23 och färförskjutningen blir totalt 49<sup>0</sup>. Luftkanalens dynamik kan ej försummas i det frekvensområde som är av reglertekniskt intresse.

Värmetransporten genom strömning bestäms av flödet och kan beräknas med god noggrannhet och kan anges som

$$q = Av_{pc} \quad (4.12)$$

### Värmeledning

Värmeledning förekommer i många klimatprocesser. Den är ofta förenad med värmelagring. Värmelagringen dämpar temperaturförlopp starkt. Om värmelagringen i ett vanligt rums väggar, golv och tak försummas, så blir temperaturförloppen t.ex. helt orimliga. För att erhålla användbara modeller är det därför väsentligt att beskriva värmeledning och värmelagring på ett tillfredsställande sätt.

Värmeledning är en distribuerad process som kan beskrivas med partiella differentialekvationer. Värmeledningsmodeller blir därför ofta komplicerade. Materialdata som ingår i ekvationerna är i regel välbestämda.

Även om komponenterna är tredimensionella är deras geometri sådan att värmetransporten väsentligen endast sker i en riktning. Detta innebär en väsentlig förenkling av modellerna. Värmeledning i väggar, tak och golv är typiska exempel.

En väsentlig fråga är hur värmelagringar i t.ex. en vägg skall beskrivas. Denna fråga har besvarats av Profos och Hemmi (1965). Under vissa förutsättningar så kan en vägg betraktas som en tunn vägg (punktformig massa) och under andra som halvoändlig. De väggar som under de givna förutsättningarna ej kan klassas som tunna eller halvoändliga måste förenklas genom att dela väggen i flera skikt. Redan ett fåtal skikt ger ofta ett bra resultat.

För att en vägg skall kunna behandlas som tunn vägg så kräver Profos och Hemmi (1965) att värmeflödet in i väggen i samband med en sinusvarierande

lufttemperatur ej får avvika mer än 1% från det beräknade värdet. Kravet kan då formuleras som en olikhet mellan väggens materialdata  $\rho$ ,  $c$  och  $\lambda$ , dess tjocklek  $d$  och frekvensen  $\omega$ .

$$d < 0,45\sqrt{\lambda/\rho c \omega} \quad (4.13)$$

Modellen för den tunna väggen består av två värmemotstånd, som är hälften av väggens totala värmemotstånd, och en värmekapacitet, som är lika med väggens hela värmekapacitet.

Ett ofta förekommande krav för att en vägg skall kunna behandlas som en halvoändlig vägg för en temperaturpåverkan med en viss frekvens  $\omega$  är att utgångsamplituden skall vara mindre än 1% av ingångsamplituden. Detta leder till en liknande olikhet mellan vägg tjocklek  $d$ , frekvens  $\omega$  och materialdata

$$d \geq 6,5\sqrt{\lambda/\rho c \omega} \quad (4.14)$$

De frekvenser som är av intresse ur reglerteknisk synpunkt ligger i området 0,1 rad/sek - 0,005 rad/sek. Motsvarande periodtider är 1 - 20 minuter. För några olika material har i tabell 4.1 gränstjockleken beräknats för att en vägg skall kunna behandlas som halvoändlig.

Värdena på gränstjockleken visar att de flesta ytor som förekommer i ett normalt rum kan betraktas som halvoändliga.

Förhållandet mellan gränstjockleken för den tunna väggen och för den halvoändliga är omkring 1:15 för en och samma frekvens. Om det aktuella frekvensområdet skall tas med i betraktning, så ökar förhållandet till 1:60. Värdena i tabell 4.1 kan användas som gränstjocklek för den tunna väggen genom att dividera med 60.

Överföringsfunktionen mellan väggytans temperatur  $x(t,0)$  och det omgivande mediets temperatur  $u(t)$  kan beräknas för en halvoändlig vägg. Inuti väggen gäller värmeledningsekvationen och vid båda väggytorna måste ett randvillkor vara uppfyllt. Vid kontaktytan mellan väggen och mediet gäller att

Tabell 4.1 - Väggtjocklekskrav för att en vägg skall kunna approximeras som halvoändlig för frekvenser större än 0,005 rad/sek.

Material	Materialdata			Gränstjocklek
	$\lambda$ W/m °C	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$c$ J/kg °C	$d$ mm
betong	1,4	2200	960	84
lättbetong	0,22	800	960	58
gips	0,18	900	840	53
trä	0,15	500	2700	36
stål	50	7800	490	390
mineralull	0,035	40	840	104

$$h(u(t) - x(t,0)) = -\lambda \frac{\partial x(t,0)}{\partial z} \quad (4.15)$$

och vid den andra ytan skall värmetransporten vara noll, dvs

$$0 = \lambda \frac{\partial x(t,\infty)}{\partial z} \quad (4.16)$$

Värmeledningsekvationen blir följande

$$\frac{\partial x(t,z)}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 x(t,z)}{\partial z^2} \quad z > 0 \quad (4.17)$$

Genom att Laplace-transformera värmeledningsekvationen fås

$$G(s) = \frac{1}{1 + \sqrt{s\rho c\lambda/h^2}} \quad (4.18)$$

### Ideal blandning

Blandning förekommer ofta i klimatprocesser. Två typfall kan särskiljas, nämligen dels blandning av två flöden till ett flöde och dels inblandning av ett flöde i en stor volym. I det senare fallet så bortföres oftast ett



lika stort flöde och i fortsättningen så skall detta fall behandlas.

I en ventilerad lokal tillföres luft ofta med en temperatur skild från lokalens. Temperaturen på den luft som lämnar lokalen är oftast densamma som i lokalen. En enkel modell mellan tilluft- och frånlufttemperatur är därför av stort reglertekniskt intresse, eftersom detta är en vanlig reglerloop.

Ett vanligt antagande vid modellbygge är att ideal blandning sker i en viss volym så att t.ex. temperaturen eller koncentrationen är densamma överallt i volymen. Detta antagande görs ofta för luftmassan i ett rum. Normala luft-hastigheter i ett rum är omkring 0,1 - 0,2 m/sek, vilket medför att rums-luften är ganska väl blandad efter en minut för ett normalt rum. Denna tid skall jämföras med den tid det tar att tillföra den luftmängd som motsvarar hela rumsvolymen. Tiden för en luftväxling är sällan kortare än 10 minuter, vilket motsvarar 6 luftväxlingar per timme. Den korta inblandningstiden på en minut kan därför försummas jämfört med luftväxlingstiden.

Om rumsluften antas vara idealt blandad, så kan rumslufttemperaturen  $x(t)$  beskrivas med en första ordningens differentialekvation. Värmeutbyte med omgivningen sker via ytan  $A$  med värmeövergångstalet  $h$ . Vidare sker värmeutbyte med till- och frånluften. Antalet luftväxlingar antas vara  $n$ . Till-luftstemperatur betecknas  $u_1(t)$  och omgivningens temperatur  $u_2(t)$ . Luft-massans värmekapacitet betecknas med  $C$ . Då gäller att

$$C \dot{x}(t) = - (Ah+nC)x(t) + nCu_1(t) + Ahu_2(t) \quad (4.19)$$

Överföringsfunktionen mellan tillufttemperaturen  $u_1(t)$  och rumslufttemperat-uren  $x(t)$  är

$$G(s) = \frac{K}{sT + 1} \quad (4.20)$$

Den statiska förstärkningen  $K$  och tidskonstanten  $T$  fås som

$$K = nC/(nC+Ah) \quad (4.21)$$

$$T = C/(nC+Ah) \quad (4.22)$$

Förstärkningen  $K_1$  är alltid mindre än 1,0, om värmeutbyte kan ske mellan rumsluften och omgivningen. Tidskonstanten är alltid mindre än tiden för en luftväxling och avtar, när rumsluftens värmeutbyte med omgivningen ökar.

I modeller, som är avsedda för beräkning av rumslufttemperatur för flera dygn, försummas rumsluftens värmekapacitet. Rumsluftens temperatur blir då rent resistivt kopplad till olika yt- och masstemperaturer i modellen. I regel sker beräkning av olika temperaturer i dessa modeller endast varje timme.

Det bör observeras att vid inblåsning av luft i ett rum påverkas blandningsgraden förutom av inblåsningssättet också av inblåsningsslutens temperatur relativt rumsluften. Vid inblåsning i eller vid taket kan övertempererad inblåsningsslut lägga sig under taket, medan undertempererad inblåsningsslut snabbt sjunker ner mot golvet.

#### Sammanfattning.

De grundläggande fysikaliska processerna som behövs för modellbygget är således välkända. I princip kan man ställa upp modeller baserade på fysikaliska ekvationer. Det finns två problem. Det ena är att avgöra hur energiupplagringen skall beskrivas. Det andra är att även om ekvationernas form är kända så ingår parametrar, som ej kan bestämmas a priori. Ett exempel på en sådan parameter är värmeövergångstalet vid en yta. Det är därför osäkert om tillräckligt noggranna modeller kan tas fram med enbart a priori kunskap om processernas fysik.

## 2. MODELLSTRUKTURER

I detta avsnitt skall ett speciellt problem diskuteras. De modeller som erhålls ur balansekvationerna består dels av differentialekvationer och dels av statiska samband. I princip är det naturligtvis lätt att använda de statiska sambanden till att eliminera vissa variabler, men detaljerna är komplicerade och det är lätt att göra fel. Det är därför fördelaktigt att bibehålla de ursprungliga ekvationerna och att göra de erforderliga manipulationerna med datorprogram. En liknande slutsats gjordes av Eklund (1972) vid studier av modeller för ångpannor.

Linjäriseras tidigare beskrivna mekanismer för värmetransport, erhålles en modell med följande generella strukturbeteckningar.

Inför

$x(t)$  temperaturvektor av dimension  $n$  för kroppar som kan lagra energi

$z(t)$  temperaturvektor av dimension  $m$  för kroppar som ej kan lagra energi

$u(t)$  insignalvektor av dimension  $p$  som innehåller olika temperaturer och effekter som påverkar modellen och ej påverkas av  $x(t)$  eller  $z(t)$

Alla differentialekvationer, som förekommer i modellen kan skrivas på följande sätt

$$V \dot{x}(t) = A'x(t) + B'u(t) + C'z(t) \quad (4.23)$$

De statiska ekvationerna kan skrivas som

$$0 = D'x(t) + E u(t) + F z(t) \quad (4.24)$$

$V$ ,  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$ ,  $D'$ ,  $E$  och  $F$  är konstanta matriser och deras dimensioner är  $(n \times n)$ ,  $(n \times n)$ ,  $(n \times p)$ ,  $(n \times m)$ ,  $(m \times n)$ ,  $(m \times p)$  och  $(m \times m)$ . Matrisen  $V$  är en diagonal matris vars diagonalelement utgörs av värmekapaciteter för motsvarande tillstånds temperatur. Inversen till matrisen  $V$  existerar alltid. Matriselementen i matriserna  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$ ,  $D'$ ,  $E$ ,  $F$  är genomgående värmekonduktanser mellan de olika kropparna i modellen.

Om hjälpvariabeln  $z(t)$  valts på ett korrekt sätt, så existerar alltid inversen till matrisen  $F$ . Detta innebär att hjälpvariabeln  $z(t)$  alltid kan beräknas från enbart  $x(t)$  och  $u(t)$  med ekvationen. De nya ekvationerna blir nu

$$\dot{x}(t) = A x(t) + B u(t) \quad (4.25)$$

$$z(t) = G x(t) + H u(t) \quad (4.26)$$

där

$$A = V^{-1}(A' - C'F^{-1}D') \quad (4.27)$$

$$B = V^{-1}(B' - C'F^{-1}E) \quad (4.28)$$

$$G = -F^{-1}D' \quad (4.29)$$

$$H = -F^{-1}E \quad (4.30)$$

Vid modellbygget är det fördelaktigt att ställa upp ekvationerna (4.23) och (4.24) och sedan använda datorprogram för att generera tillståndsekvationerna (4.25) och (4.26).

### 3. IDENTIFIERING AV INSIGNAL-UTSIGNAL-MODELLER

Eftersom det finns flera parametrar i modellerna som är okända och eftersom det är oklart hur ett distribuerat system skall approximeras så får den fysikaliska kunskapen kompletteras med experiment. Det är t.ex. möjligt att variera insignalen och registrera utsignalen och tillämpa processidentifiering. Tekniken för processidentifiering är välkänd. Några referenser är Åström och Bohlin (1965), Åström (1968), Gustavsson (1969) och Söderström (1974).

För att kunna bestämma okända parametrar i en fysikalisk modell så är det först lämpligt att bestämma ordningstalet. Detta sker genom att anpassa generella överföringsfunktionsmodeller med olika ordningstal. En ordningstalsbestämning ger då indikation på en rimlig approximationsgrad för den approximerade fysikaliska modellen (strukturmodellen). I denna avhandling har minsta kvadrat (LS) och maximum likelihood-metoden använts (ML). Med användandet av

standardbeteckningar anpassas modeller av typen

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-k) + C(q^{-1})e(t) \quad (4.31)$$

Här är  $A(q^{-1})$ ,  $B(q^{-1})$  och  $C(q^{-1})$  polynom av förskjutningsoperatorn  $q$ . Polynomen kan skrivas som

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n} \quad (4.32)$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + \dots + b_nq^{-n} \quad (4.33)$$

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_nq^{-n} \quad (4.34)$$

### Identifiering av strukturmodellen

Om man övertygat sig om att en modell har ett visst ordningstal, då kan man ställa upp ett antal fysikaliska ekvationer som får samma eller större ordningstal som erhöles för den generella insignal-utsignalmodellen. Med hjälp av datorprogram så kan den uppställda strukturmodellen anpassas till mätdata. Datorprogrammet minimerar en förlustfunktion genom att variera de okända fysikaliska parametrarna.

Innan en strukturmodell anpassas till mätdata så måste dess struktur kontrolleras så att alla de söka modellparametrarna kan bestämmas. Detta sker genom att beräkna överföringsfunktionen, vars parametrar är funktioner av de okända och kända fysikaliska parametrarna. För en modell med en insignal, en utsignal och ordningstalet  $n$  så kan högst  $2n$  parametrar bestämmas.

### Några synpunkter på identifiering

Minst två experiment måste användas vid identifieringen, dels ett PRBS experiment för bestämning av den dynamiska modellen och dels ett experiment för att avgöra hur linjär processen är. Ett andra PRBS experiment kan vara lämpligt att använda för att undersöka om experimentförhållanden påverkas av icke observerade faktorer. Modellen från det ena experimentet simuleras då direkt och utan någon modellenanpassning med mätdata från det andra experimentet och tvärtom. Vid dålig överensstämmelse föreligger troligen skillnader i experimenten.

Modellen för en viss arbetspunkt erhålls genom att ta bort medelvärdet hos in- och utsignaler till modellen. Detta innebär att viss fysikalisk information om processen förloras (statiska egenskaper). Om inga medelvärden tas bort så erhålls en modell som beskriver det globala beteendet. Denna modell innehåller de statiska egenskaperna.

Felaktiga mätvärden måste rättas annars kan modellanpassningen bli helt felaktig. Detta sker bäst genom att rita upp de olika in- och utsignalerna som funktion av tiden. Större fel kan då lätt observeras och enstaka fel rättas genom interpolation. Mindre fel, som är svåra att observera på detta sätt, kan framträda bättre vid simulering av en modell som har anpassats till mätdata. Därefter görs en ny modellanpassning.

Hur experimentet startas påverkar resultatet av modellanpassningen. Processen skall helst befinna sig i jämvikt i starten med en insignal som är lika med medelvärdet på den insignal som skall användas under försöket. Om insignalen skall anta värden 0, och 1, under experimentet och om start sker från ett jämviktsläge med insignalen skild från 0,5, så kommer långsamma moder i systemet att exciteras. Dessa moder är i regel ej av reglertekniskt intresse. Modellanpassningen kommer däremot att modellera även dessa moder. Modellanpassningen kan därför bli en kompromiss mellan snabba och långsamma moder i en modell.

#### Några synpunkter på experiment

Experiment kan både vara tids- och arbetskrävande att utföra, därför är det väsentligt att ett experiment ges rätt utformning. Utformningen är ett samspel mellan flera olika frågeställningar. Några av dessa är följande:

- Modell för vilket ändamål?
- Vilken modellanpassningsmetod skall användas?
- Vilket tidsområde är av intresse?
- Är processen olinjär?
- Är processen återkopplad?
- Hur skall insignal väljas?

Skall modellen användas för att ta fram en regulator bör datainsamling ske på samma sätt som regulatorn kommer att arbeta. Detta innebär att tidsynkronisering mellan insignal och utsignal bör helst vara densamma och samplingsintervallet likaså. Vidare får de fysikaliska förutsättningarna ej förändras genom att montera in andra ställdon eller givare. Detta för att eliminera dynamiken hos långsamma ställdon och givare. Om experimentet syftar till att få ökad kunskap om en viss processdel, då kan det vara lämpligt att försöka eliminera givare- eller ställdonsdynamik på detta sätt.

Modellanpassningsmetoden bestämmer i en del fall hur experimentet skall utföras. Vid frekvensanalys skall insignalen till processen vara en sinusfunktion. Denna metod är experimentellt tidskrävande och det kan ofta vara svårt att generera en sinusformad insignal till processen. Vid stegsvarsanalys och impulssvarsanalys använder man sig av ett steg resp. impuls i insignalen. Dessa metoder är mycket känsliga för störningar. Igengäld är det lätt att generera dessa signaler.

Andra metoder kräver att insignalen skall vara ständigt exciterande, vilket i stort sett betyder att alla moder hos processen skall exciteras.

En signalsekvens som uppfyller kravet ständigt exciterande är Pseudo Random Binary Sequence eller PRBS. Denna signal antar endast två värden, t.ex.  $\pm a$ , vilket är lätt att implementera. Signalen växlar tecken vid tidpunkter motsvarande multipler av en grundperiod, som betecknas med  $T$ . Den är periodisk med perioden  $N \cdot T$ , där  $N$  bestäms av sekvensens ordningstal  $n$  enligt formeln  $N = 2^n - 1$ . Den kortaste tiden, som signalen är konstant, är  $T$  tidsenheter och den längsta är  $nT$  tidsenheter. Ett exempel på en PRBS signal återfinns i FIG 4.1. Genereringen av PRBS kan ske med en speciell generator eller med ett datorprogram, om en dator används. För den minsta och största tidskonstanten som kan bestämmas, gäller att

$$T_{\min} > 2T$$

$$T_{\max} < NT/5$$

Det är givetvis förutsatt att samplingsintervallet är  $T$  tidsenheter. Genom att göra samplingsintervallet  $T_s$  mindre än  $T$  kan i stället den minsta tidskonstanten som kan bestämmas beräknas till

$$T_{\min} > 2T_s$$

När de tre parametrarna  $T_s$ ,  $T$  och  $n$ , som fastlägger insignalen tidsmässigt, bestämts så återstår det att bestämma amplituden hos insignalen. Amplituden bör väljas så stor som möjligt för att få ett så stort signalbrusförhållande som möjligt. Om däremot processen är olinjär bör amplituden ej väljas större än att den linjära modellen kan anpassas väl till mätdata.

Om en process är olinjär, måste i regel flera experiment utföras på olika insignalnivåer. Med ett enda PRBS experiment kan man ej avgöra om en process är olinjär, vilket inses av exemplet i FIG 4.2. Processen antas endast vara statistiskt olinjär.

Frågan om en process är statistiskt olinjär kan avgöras genom att mäta sambandet mellan insignal och utsignal i stationärt tillstånd. Mätningarna kan vara tidskrävande, eftersom det tar lång tid för att uppnå stationaritet. Svårigheter kan också uppträda vid olinjäriteter såsom glapp och hysteres.

Förutom de signaler som är av direkt intresse vid modellbestämningar är det lämpligt att mäta andra signaler, som normalt skall vara konstanta och därmed ej påverka experimentet. Eventuella oförklarligheter i utsignalen kan då eventuellt förklaras med de extra uppmätta signalerna. Vid temperaturmätningar kan en av dessa extra signaler vara från en temperaturreferens, vilket kan vara lämpligt för kontroll av mätutrustningen.

Alla experimentförhållanden som inte mäts skall dokumenteras i ett mätprotokoll eller en loggbok. Denna dokumentation kan knappast göras alltför omfattande. Den blir av stor betydelse när det inte är möjligt att upprepa experimentet.

Experiment bör i första hand ske utan att någon regulator är inkopplad, dvs med ett öppet system. Detta är inte alltid möjligt att genomföra av säkerhets-, tekniska eller ekonomiska skäl. Processen kan vara instabil och därför måste en regulator vara inkopplad. Tidigare har det ej varit klarlagt när en process kan identifieras i ett slutet system. Vid en identifiering av en process i ett slutet system, kunde resultatet bli att processen identifierades



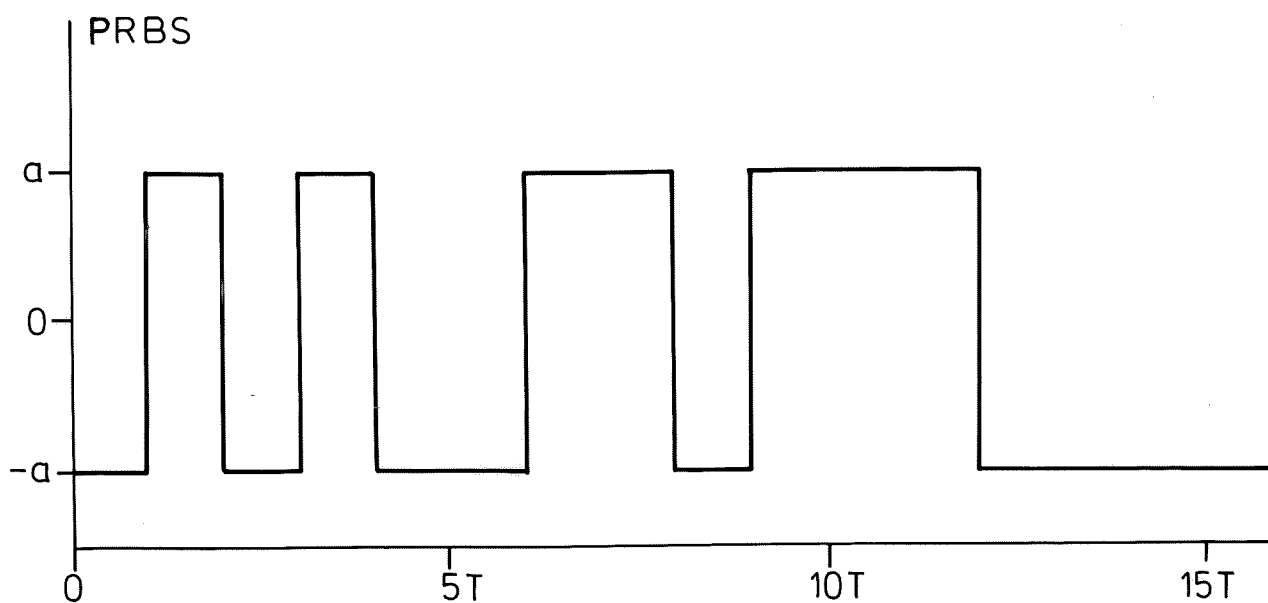


FIG 4.1 - Exempel på PRBS med ordningstalet  $n = 4$ .

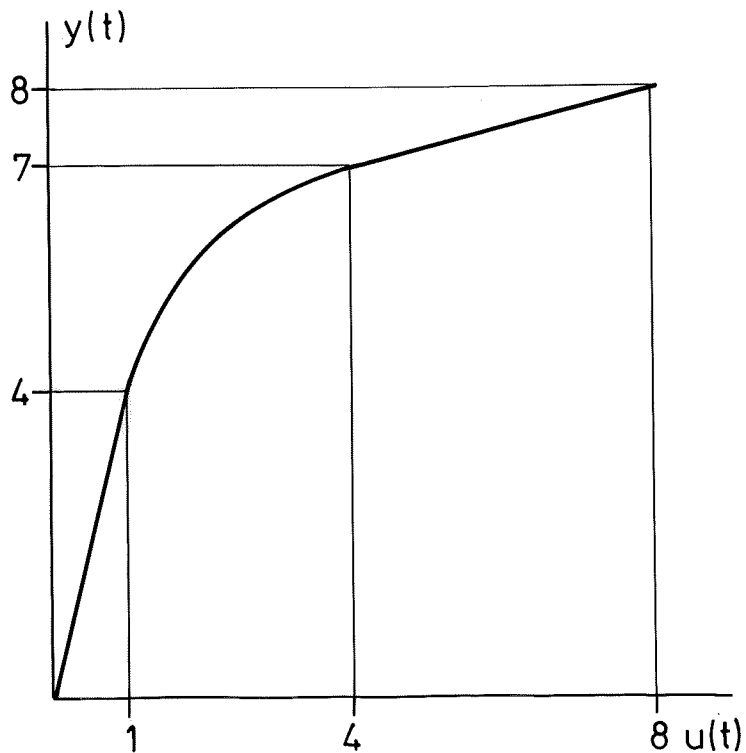


FIG 4.2 - Exempel på olinjäritet som vid identifiering kan ge olika statistik förstärkning, 4, 1 och 0,25, om insignalen  $u(t)$  har varierats (0,1), (1,4) resp. (4,8).

som inversen av regulatorn. I ett arbete av Gustavsson, Ljung och Söderström (1974) ges villkor för hur ett experiment med ett slutet system kan utföras. Kravet är att en referens insignal, en olinjär regulator, en regulator med högt ordningstal eller en styckvis linjär regulator skall användas vid experimentet.

#### 4. REFERENSER

Adamson, B., 1969: Program för studier av utomhusförhållandenas inverkan på rumsklimatet. IB, LTH, AR 1969:2.

Adamson, B., 1974: Kompendium i byggnadstekniska värmeproblem. IB, LTH

McAdams, William H., 1954: Heat transmission. Third edition. McGraw-Hill Book Company.

Eklund, K., 1972: Linear Drum Boiler-Turbine Models. DAC, LIT, Report 7117.

Gustavsson, J., 1969: Parametric Identification on Multiple Input, Single Output, Linear Dynamic Systems, DAC, LIT, Report 6907.

Gustavsson, I., Selander S., Wieslander, J., 1973: IDPAC User's Guide. DAC, LIT, Report 7331.

Gustavsson, I., Ljung, L., Söderström, T., 1974: Identification of Linear Multivariable Process Dynamics Using Closed Loop Experiments. DAC, LIT, Report 7401.

Hemmi, P., 1967: Temperaturübertragungsverhalten durch strömter Räume. Diss ETH, Zürich.

Holman, J.P., 1968: Heat Transfer. Second Edition. McGraw-Hill Book Company.

Källblad, K., 1971: Spegling av värmeledningsekvationen i en homogen vägg. IB, LTH, ej publicerat material.

Profos, P., Hemmi, P., 1965: Untersuchungen zur Dynamik der Klimaregelung. Neue Technik, 1965.

Söderström, T., 1974: Kompendium i processidentifiering. Teknikum, Uppsala.

Aström, K.J., Bohlin, T., 1965: Numerical Identification of Linear Dynamic Systems of Normal Operating Records. Proceedings of the IFAC Conference on Self-Adaptive Control Systems, Teddington.

Aström, K.J., 1968: Lectures on the Identification Problem the Least Square Method. DAC, LIT, Report 6806.

## KAPITEL 5

### EXEMPEL PÅ MODELLBYGGE

Under avhandlingsarbetet har många olika klimatprocesser undersökts såväl experimentellt som teoretiskt med användande av de metoder som beskrivits i kapitel 4. Resultaten finns dokumenterade i ett flertal rapporter av författaren (se referenserna).

Målsättningen för undersökningarna har varit att erhålla modeller som kan användas för att bedöma reglerproblemets svårighetsgrad, för att dimensionera regulatorer och för att simulera reglersystem. Modellerna skall således beskriva processdynamiken och processernas störningar. Med utgångspunkt från de krav som uppställts i kap. 2 så är en noggrannhet i temperatur på några tiondels grader tillräckligt. Det är också tillräckligt att modellerna beskriver processerna bra i tidsskalan (1-20 min). Det bör noteras att de modeller som behövs för reglerproblemen ej nödvändigtvis är lämpliga för statisk dimensionering av processerna. De reglertekniska modellerna gäller oftast för beteendet kring en viss arbetspunkt. Förstärkningen i dessa modeller motsvarar alltså den lokala förstärkningen. Vid statisk dimensionering av en process är det givetvis den totala processförstärkningen som är av intresse.

Slutsatserna av de genomförda undersökningarna är att de flesta klimatprocessers reglertekniska egenskaper kan beskrivas med jämförelsevis enkla modeller. Modellernas struktur kan ofta erhållas ur fysikaliska grundekvationer. Det har däremot visat sig att det ofta är svårt att finna goda värden på de i modellerna ingående parametrarna, t.ex. värmeövergångstal ur kända fysikaliska egenskaper. Vissa parametrar i modellerna får därför bestämmas experimentellt med användning av processidentifiering. Detta har visat sig vara jämförelsevis enkelt att utföra.

Då en grundläggande svårighet med de statiska dimensioneringsmodellerna är bristande kunskap om viktiga parametrar vore det därför också motiverat att förbättra de statiska modellerna genom att tillämpa processidentifiering.

Avsikten med detta kapitel är att ge några exempel på modellbygge. Följande processer behandlas:

<u>process</u>	<u>insignal</u>	<u>utsignal</u>
rum med luftinblåsning	tillufttemperatur	frånlufttemperatur
luftkanal	inloppstemperatur	utloppstemperatur
eftervärmare	vattenflöde	lufttemperaturökning
entalpiväxlare	varvtal	temperaturverkningsgrad
bostadsområde	utetemperatur	fjärrvärmeeffektuttag

Exemplen är valda för att illustrera hur fysikaliska modeller, input-output modeller och strukturmodeller kan erhållas.

De teoretiska modellerna är genomgående kraftigt förenklade. Avsikten med dem är att få en enkel uppskattning av statiska och dynamiska egenskaper, som kan användas vid utformning av experiment och i vissa fall även för bestämning av regulatorer. Det skall framhållas att modellerna ej är avsedda att användas inom ett tidsområde från sekunder till dygn utan endast den dominerande dynamiken är av intresse. Den dynamik som är av reglertekniskt intresse ligger oftast i området 1-20 minuter. Detta innebär att rena transportfördröjningar på grund av i processen ingående flöden har försummats. För de flesta klimatanläggningar är transporttiderna för luft- och vattenflödena försumbara jämfört med den övriga dynamiken. Modellerna kan ej heller användas för simulering av mycket långsamma förlopp såsom dygnstemperaturvariationer vid olika belastningar såsom sol, personer, belysning m.m. I de aktuella rumsmodellerna antas att temperaturen i väggar, golv och tak ej påverkas av rumslufttemperaturen.

Vidare är modellerna i regel avsedda att användas kring en arbetspunkt med måttliga variationer i insignaler och utsignal. Vid stora variationer är det ej säkert att en modell gäller då den verkliga processen kan vara olinjär.

## 1. RUM MED LUFTINBLASNING

En förenklad bild av ett ventilerat rum visas i FIG 5.1

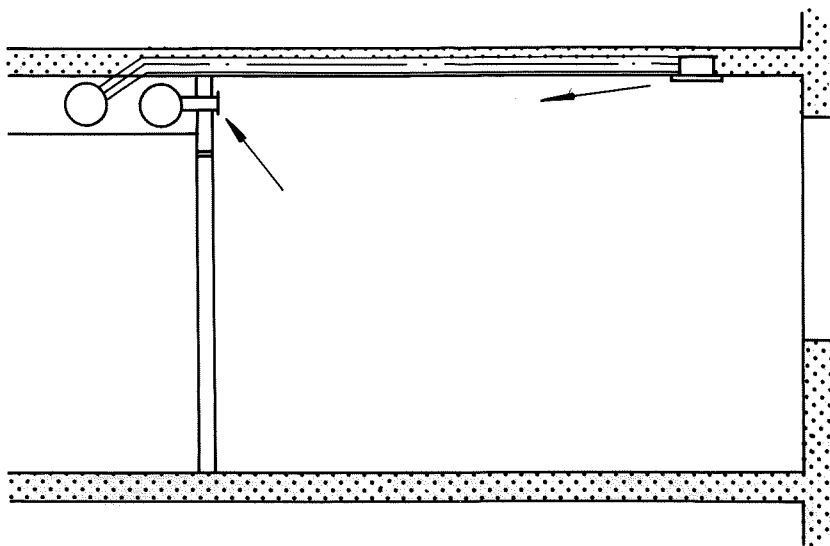


FIG 5.1 - Schematisk bild av ett ventilerat rum.

Rummet ventileras genom att luft strömmar genom rummet. Temperaturen regleras genom att förändra temperaturen hos den inströmmande luften (tillluften). För att reglera temperaturen är det således nödvändigt att känna till den dynamik som beskriver hur temperaturen i rummet och i den utströmmande luften (frånluften) påverkas av den inströmmande luftens temperatur. Modeller har bestämts experimentellt och teoretiskt för tre olika rum, en lektionssal, ett möblerat försöksrum och ett omöblerat försöksrum. Kvoten mellan luftflöde och rumsvolym, som inom VVS-branschen kallas antalet luftväxlingar, är en viktig parameter. Antalet luftväxlingar har därför varierats i försöken. Data för rummen ges i tabell 5.1.

För lektionssalen mättes frånlufttemperaturen, för det möblerade försöksrummet mättes rumsluften och i det möblerade försöksrummet var utsignalen medelvärdet av tre temperaturgivare i rummet.

Tabell 5.1

Rum	Volym	Begränsnings- yta	Antal luftväxlingar
Lektionssal	260 m <sup>3</sup>	406 m <sup>2</sup>	10,8/h
Omöblerat	49 m <sup>3</sup>	87 m <sup>2</sup>	10,4/h, 12,4/h
Möblerat	50 m <sup>3</sup>	80 m <sup>2</sup>	3,2/h, 6,6/h, 8,2/h

Fysikalisk modell

En matematisk modell kan lätt erhållas genom en energibalans. Det finns två väsentliga problem att beskriva värmeledning till väggar och att ange temperaturfördelningen i rummet. Statistiskt kan temperaturskillnaderna i ett rum uppgå till några grader. Erfarenheter från flera olika experimentserier visar att lufttemperatur i olika punkter i ett rum är nästan identiska för snabba variationer i tidsområdet 1-20 minuter. Detta visar att luften blandas snabbt och väl i ett ventilerat rum. Några referenser är Jensen (1973a) och Jensen (1974c). Med de lufthastigheter som normalt förekommer i ventilerade rum, ca 0,1 m/s, så är också luften ganska väl blandad efter en minut. För att ställa upp energibalansen för rummet görs följande antaganden:

1. Rumslufttemperaturen är densamma överallt (ideal blandning)
2. Omgivningstemperaturen är konstant och påverkas ej av rumsluften. (Omgivningen avser golv, tak, väggar och föremål i rummet.)
3. Värmeutbytet med omgivningen är proportionellt mot temperaturdifferensen.

Omgivningens värmekapacitet är ofta omkring 100 gånger större än rumsluftens. Dess temperatur påverkas endast lite under de korta tidsperioder, som är av intresse vid reglering, varför antagandet om att omgivningens temperatur är konstant är en god approximation.

Under ovanstående antaganden kan energibalansen skrivas på följande sätt:

Värmebalansekvationen är följande:

$$C \dot{x}(t) = - (nC + Ah)x(t) + nC u_1(t) + Ah u_2(t) \quad (5.1)$$

Här är

$x(t)$	lufttemperaturen i rummet
$u_1(t)$	temperaturen i inströmmad luft
$u_2(t)$	omgivningens temperatur
$C$	rumsluftens värmekapacitet
$A$	yta mellan rumsluft och omgivning
$h$	värmeövergångstal mellan rumsluft och omgivning
$n$	antal luftväxlingar per tidsenhet

Den dynamik som relaterar temperaturen i rummet, eller i den utströmmande luften, till temperaturen i den inströmmande luften kan således beskrivas som ett första ordningens system. Överföringsfunktionen blir

$$\frac{L\{x\}}{L\{u_1\}} = G(s) = \frac{K}{sT + 1} \quad (5.2)$$

där tidskonstanten  $T$  och förstärkningen  $K$  ges av

$$T = C/(nC + Ah) \quad (5.3)$$

$$K = nC/(nC + Ah) \quad (5.4)$$

De tre parametrarna  $C$ ,  $A$  och  $n$  kan lätt mätas eller beräknas. Däremot är det svårare att fastlägga värmeövergångstalet  $h$ . Vanliga värden för rumsytor är  $1-3 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Tidskonstanten  $T$  och förstärkningen  $K$  har beräknats för de olika försöksrummen med värmeövergångstalet  $h = 1, 2$  och  $3 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Resultaten framgår av tabell 5.2.

### Experimentell bestämning av dynamiska modeller

Med rimliga antaganden erhålls således en mycket enkel dynamisk modell för det ventilerade rummet. För att undersöka om modellen stämmer har processdynamiken bestämts experimentellt med hjälp av de metoder som beskrevs i kap.4. Vid experimenten varierades den inströmmande luftens temperatur. Processdynamiken identifierades sedan med minsta kvadratmetoden. Resultaten visade att en modell av första ordningen var tillräcklig. Parametrarna  $a$  och  $b$  för en

samplad modell av första ordningen skattades. Tidskonstanten  $T$  och förstärkningen  $K$  bestämdes sedan genom kända formler. Resultaten framgår av tabell 5.2. I tabellen visas också de prediktionsfel som erhöles vid anpassningen (samplingsintervallet var 60 s) och tiden för en luftväxling. I FIG 5.2, FIG 5.3 och FIG 5.4 visas exempel på anpassning mellan modell och data för det möblerade försöksrummet för tre olika luftväxlingar.

### Slutsatser

Experimenten visade klart att en modell av första ordningen är tillfyllest. Såsom framgår av FIG 5.2 - 5.4 ger också en modell av första ordningen en mycket god anpassning till mätdata.

De på olika sätt framtagna modellparametrarna stämmer rätt så bra överens för värmeövergångstalet  $h = 2\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ , medan den beräknade förstärkningen  $K$  är klart större än den identifierade  $K_i$ . Experimenten ger ett värde på  $K_i$  som är cirka 0,6 ggr lägre än den fysikaliskt framtagna. Beräknas  $K$  med formeln

$$K_a = nC/(2nC+Ah) \quad (*)$$

så fås betydligt bättre överensstämmelse.

Siffrorna i tabell 5.2 visar att tidskonstanterna  $T$  och  $T_i$  är klart mindre än tiden för en luftväxling och att den approximativa förstärkningen  $K_a$  ej skiljer sig mycket från den identifierade  $K_i$ . Slutsatsen är att de identifierade första ordningens samplade modellerna med två parametrar beskriver processen bra och att dessa parametrar kan beräknas från byggnadsdata med god överensstämmelse, om förstärkningsparametern  $K$  bestäms med den empiriska formeln (\*).

Försök har gjorts med att låta omgivningens temperatur variera i modellen. Rumsmodellen blir då av andra ordningen med en värmebalansekvation för rumsluften och en för omgivningen. I denna modell är den snabba moden i överföringsfunktionen av intresse. Beräkningar visade att bättre anpassning till de experimentellt bestämda modellparametrarna kunde ej uppnås. Olika värden på omgivningens värmekapacitet provades.



Tabell 5.2 - Tidskonstant och förstärkning beräknad från fysikalisk modell (T och K) enligt ekv. (5.3) och ekv. (5.4) och bestämd genom processidentifiering ( $T_i$  och  $K_i$ ) och empirisk förstärkning  $K_a$  enligt (\*).

Rum	n	h	K	$K_a$	$K_i$	T	$T_i$	$T_x$	$\lambda$
	/h	W/m <sup>2</sup> °C				min	min	min	°C
LS	10,8	1	0,70			3,9			
		2	0,54	0,35	0,25	3,0	2,8	5,5	0,076
		3	0,43			2,4			
FR1	10,4	1	0,66			3,8			
		2	0,49	0,34	0,37	2,8	3,3	5,8	0,105
		3	0,39			2,3			
FR1	12,4	1	0,70			3,4			
		2	0,53	0,35	0,31	2,6	2,4	4,8	0,047
		3	0,43			2,1			
FR2	3,2	1	0,40			7,5			
		2	0,25	0,20	0,20	4,7	5,7	18,7	0,015
		3	0,18			3,4			
FR2	6,6	1	0,58			5,3			
		2	0,41	0,29	0,25	3,7	3,1	9,1	0,018
		3	0,31			2,9			
FR2	8,2	1	0,63			4,6			
		2	0,46	0,32	0,26	3,4	2,7	7,3	0,024
		3	0,36			2,7			

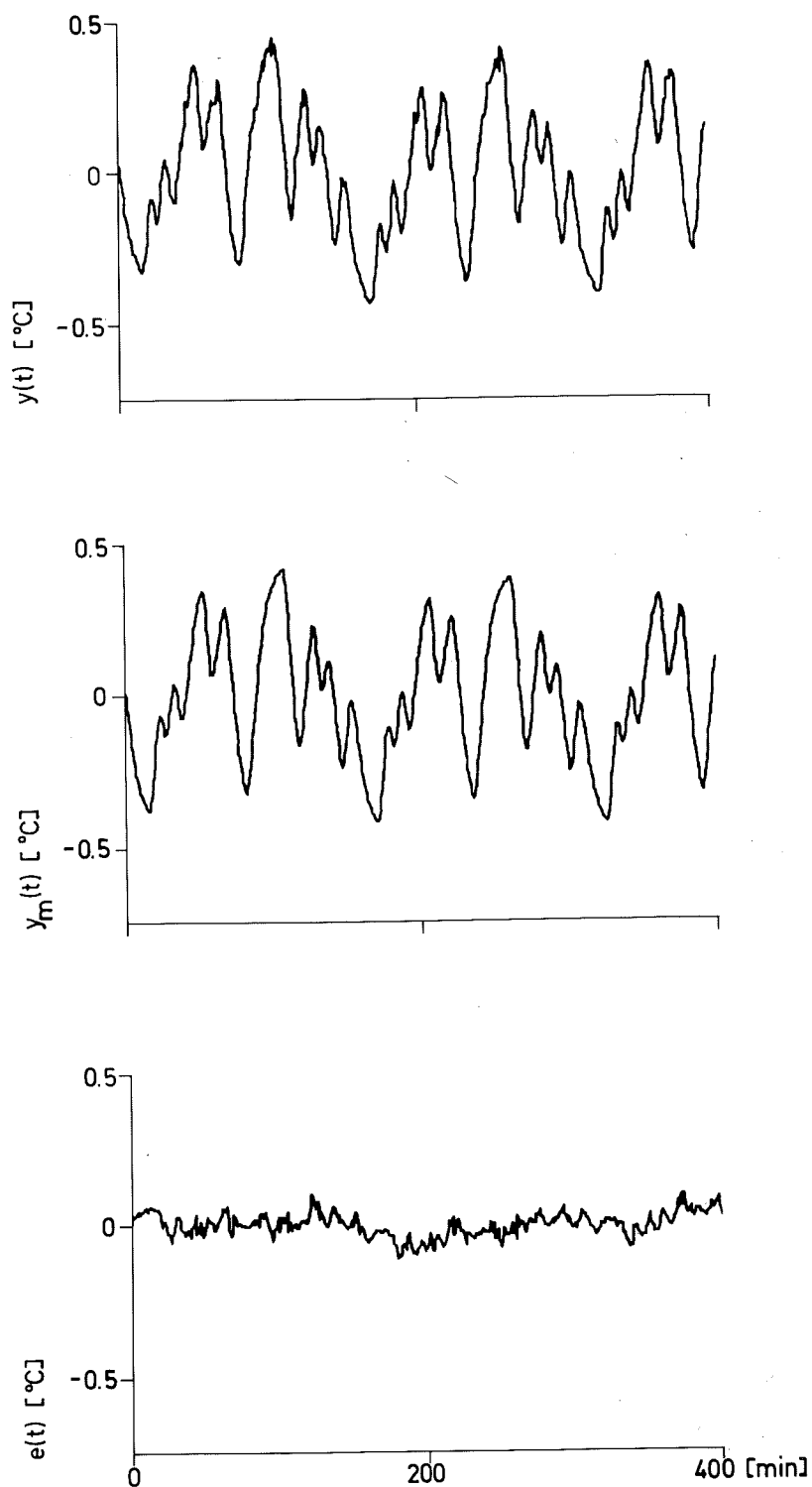


FIG 5.2 - Den uppmätta  $y(t)$  och modellens  $y_m(t)$  rumslufttemperaturavvikelse från medelvärdet för ett experiment med rum FR2 och med 3,2 luftväxlingar per timme.

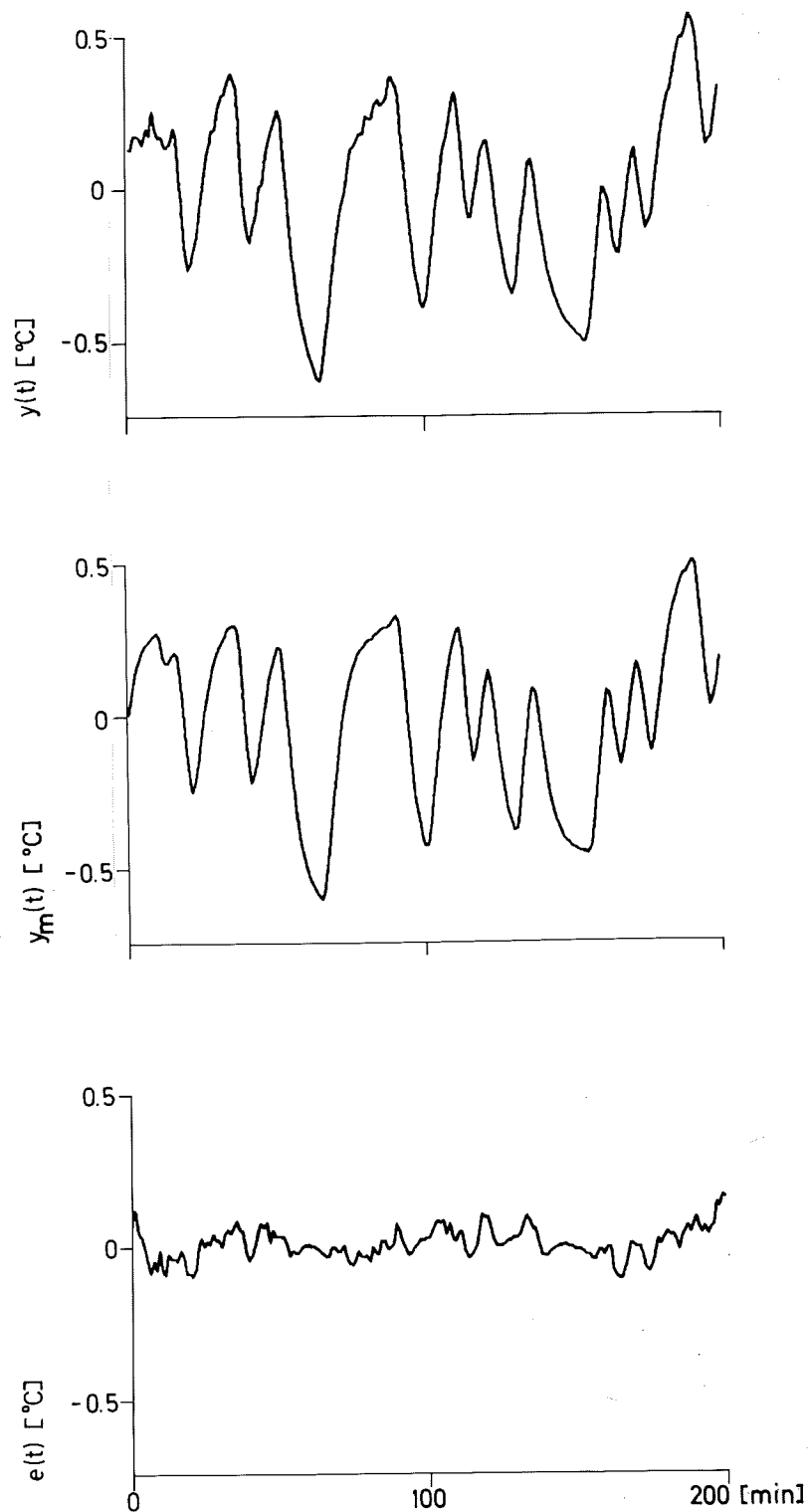


FIG 5.3 - Den uppmätta  $y(t)$  och modellens  $y_m(t)$  rumsluftstemperaturavvikelse från medelvärdet för ett experiment med rum FR2 och med 6,6 luftväxlingar per timme.

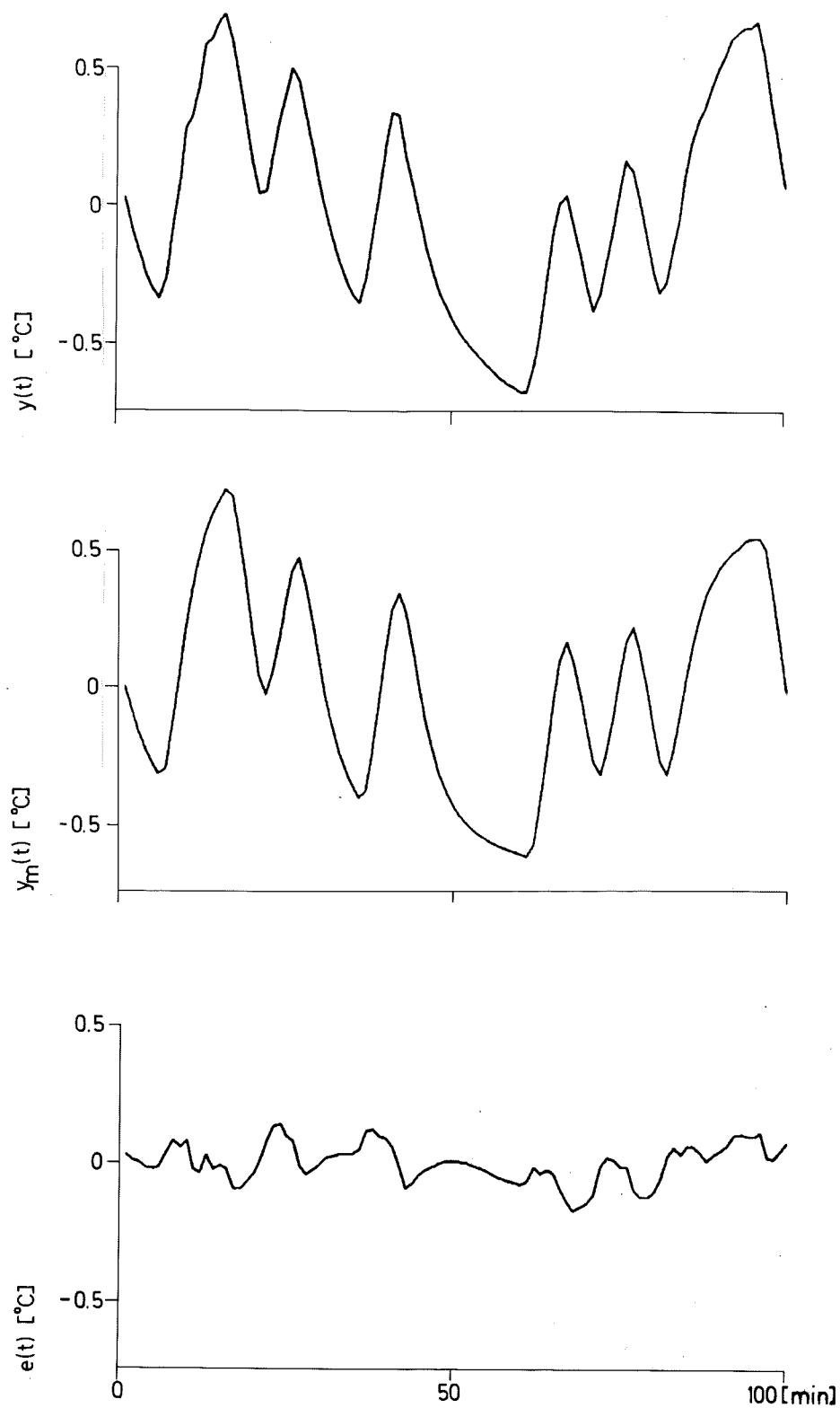


FIG 5.4 - Den uppmätta  $y(t)$  och modellens  $y_m(t)$  rumslufttemperaturavvikelse från medelvärdet för ett experiment med rum FR2 och med 8,2 luftväxlingar per timme.

## 2. LUFTKANAL

Luftkanalen är en vanlig komponent i ett klimatsystem. Kanalerna består vanligen av en utvändig isolerad plåttrumma. En förenklad skiss av en kanal visas i FIG 5.5.

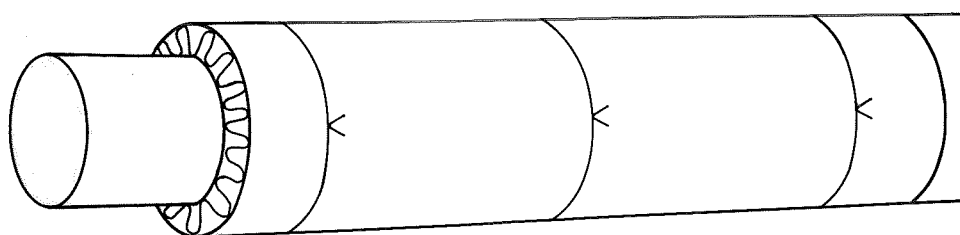


FIG 5.5 - Schematisk bild av en luftkanal.

Modellbygget som sker för luftkanalen i detta avsnitt kan mycket väl tillämpas på kanaler med andra strömmande medier, t.ex. vatten.

### Fysikaliska modeller

Dynamiken i en luftkanal bestäms dels av transportfördröjning och dels i att värme lagras upp i plåten. Strömning i en kanal ger en tidsfördröjning  $\ell/v$  där  $\ell$  är trummans längd och  $v$  strömningshastigheten. Tidsfördröjningen kan således lätt uppskattas. Lufthastigheten i kanalerna är av storleken 2-10 m/s beroende på luftkanalens tvärsnitt. Eftersom modellen skall representera systemdynamik i tidsintervallet 1-20 min så blir tidsfördröjningen mindre än 1 min om kanallängden är mindre än 120-600 m. I många fall kan således tidsfördröjningen försummas och dynamiken bestäms väsentligen av energiupplagring i kanalens plåtmassa.

Följande antaganden görs:

1. Transportfördröjningen försummas
2. Plåtens temperatur är densamma överallt (ideal blandning)
3. Luftens temperatur är densamma överallt i luftkanalen (ideal blandning)
4. Värmeutbyte mellan luft och plåt är proportionellt mot temperaturskillnaden
5. Värmeutbytet mellan luftkanal och omgivning är proportionellt mot temperaturdifferensen.

Inför beteckningarna:

$x_1(t)$	kanalluftens medeltemperatur
$x_2(t)$	plåtens medeltemperatur
$u_1(t)$	lufttemperatur före luftkanalen
$u_2(t)$	omgivningens temperatur
$C_1$	kanalluftens värmekapacitet
$C_2$	plåtmassans värmekapacitet
$h_i$	inre värmeövergångstalet (plåt-kanalluft)
$h_y$	yttre värmeövergångstalet (plåt-omgivning)
$A$	kontaktyta luft-plåt omgivning-plåt
$c$	värmekapacitet luft
$q$	massflöde luft

Energibalanser för luften och plåten ger:

$$C_1 \dot{x}_1(t) = Ah_i(x_2(t) - x_1(t)) + cq(u_1(t) - x_1(t)) \quad (5.5)$$

$$C_2 \dot{x}_2(t) = Ah_i(x_1(t) - x_2(t)) + Ah_y(u_2(t) - x_2(t)) \quad (5.6)$$

Parametrarna  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $A$  och  $cq$  kan lätt beräknas eller uppmätas medan värmeövergångstalen  $h_i$  och  $h_y$  är svåra att bestämma. I många fall är temperaturen  $u_2$  okänd. Den får då betraktas som en störning.

Om ekvationerna (5.5) och (5.6) kompletteras med en ren transportfördröjning  $\tau$  erhålls följande övergångsfunktion för luftkanalen:

$$G(s) = e^{-s\tau} \frac{cq [C_2 s + A(h_i + h_y)]}{s^2 C_1 C_2 + s [C_1 A(h_i + h_y) + C_2 (A h_i + cq)] + cq A(h_i + h_y) + A h_i h_y} =$$

$$= e^{-s\tau} \left| \frac{K_1}{1 + sT_1} + \frac{K_2}{1 + sT_3} \right| \quad (5.7)$$

Med de förenklade antagandena så beskrivs luftkanalens dynamik således av ett linjärt system av andra ordningen. Plåtmassans värmekapacitet är ofta avsevärt större än luftens värmekapacitet. En faktor 20 är ej ovanlig. Detta innebär att systemets tidskonstanter kan skilja sig avsevärt. I många fall kan modellen förenklas genom att försumma energiupplagring i luften dvs.  $C_1 = 0$ . Överföringsfunktionen (5.7) förenklas då till

$$G(s) = e^{-s\tau} \frac{cq [C_2 s + A(h_i + h_y)]}{C_2 s (A h_i + cq) + cq A(h_i + h_y) + A h_i h_y} = e^{-s\tau} \left| K_1 + \frac{K_2}{1 + sT_2} \right| \quad (5.8)$$

Modeller för luftkanaler har bestämts experimentellt. Resultaten har jämförts med ovanstående fysikaliska modell. Mätningarna har visat att resultaten har god överensstämmelse.

Exempel 1. En luftkanal med följande data har undersökts:

längd ( $\ell$ )	23,5 m
tvärsnittsarea ( $A$ )	0,45 m
plättjocklek	0,001 m
luftflöde	4000 m <sup>3</sup> /h

Dessa data ger en transportfördröjning av 3,4 s. Vid experimenten varierades inloppstemperaturen efter ett givet mönster (PRBS). Inlopps- och utloppstemperaturerna registrerades med ett samplingsintervall av 4 s. Experimenten och en analys av mätdata har beskrivits i Jensen (1973b). I modellen (5.7) beräknades alla parametrar utom  $h_i$  och  $h_y$  ur konstruktionsdata. För värmekapaciteterna användes följande numeriska värden:  $C_1 = 4,5 \text{ kJ/}^\circ\text{C}$  och  $C_2 = 130 \text{ kJ/}^\circ\text{C}$ . Parametrarna  $h_i$  och  $h_y$  bestämdes sedan genom anpassning till de experimentella data med s.k. strukturidentifiering baserad på ML-metoden.

Vid identifieringen hade inverkan av transportfördröjningen eliminerats genom att förskjuta insignalen. Resultaten framgår av tabell 5.3, vilken också visar överföringsfunktionens parametrar. I FIG 5.6 visas hur modellen överensstämmer med experimentella data.

Tabell 5.3 - Skattade värden på värmeövergångstal erhållna genom analys av

Experiment	$h_i \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$	$h_y \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$	$k_1$	$T_1 \text{ s}$	$k_2$	$T_2 \text{ s}$
1	50	1,7	0,45	1,5	0,51	140
2	50	2,0	0,45	1,5	0,50	138
3	48	1,5	0,47	1,5	0,50	144

De värden som visas i tabell 5.3 har erhållits genom analys av 600 insignal-utsignal-par. Samplingsintervallet var 4 s. Observera att summan av talen  $k_1$  och  $k_2$  är mycket nära ett. Detta innebär att energiförlusterna till omgivningen är små.

För att undersöka om de approximationer som låg till grund för den enkla modellen var rimliga anpassades också input-output modeller av olika ordningstal. Någon signifikant förbättring erhöles ej då modellernas ordningstal ökades över två. De tidskonstanter som erhöles ur insignal-utsignal modellen visar god överensstämmelse med tabell 5.3 ( $k_1 = 0,46$ ,  $T_1 = 1,6 \text{ s}$ ,  $k_2 = 0,46$ ,  $T_2 = 158 \text{ s}$ ). En mer detaljerad modell bestämdes också genom att dela upp kanalen i flera segment. Denna modell gav inte heller någon förbättring i anpassningen.

Exempel 2. Exempel 1 visar klart att för modeller som skall återge processdynamiken i tidsintervallet 1-20 minuter så kan den snabba tidskonstanten  $T_1$  försummas. Fysikaliskt innebär detta att energiupplagringen i luften försummas. Luftkanalen kan då beskrivas med överföringsfunktionen (5.8). En luftkanal med följande data har undersökts:



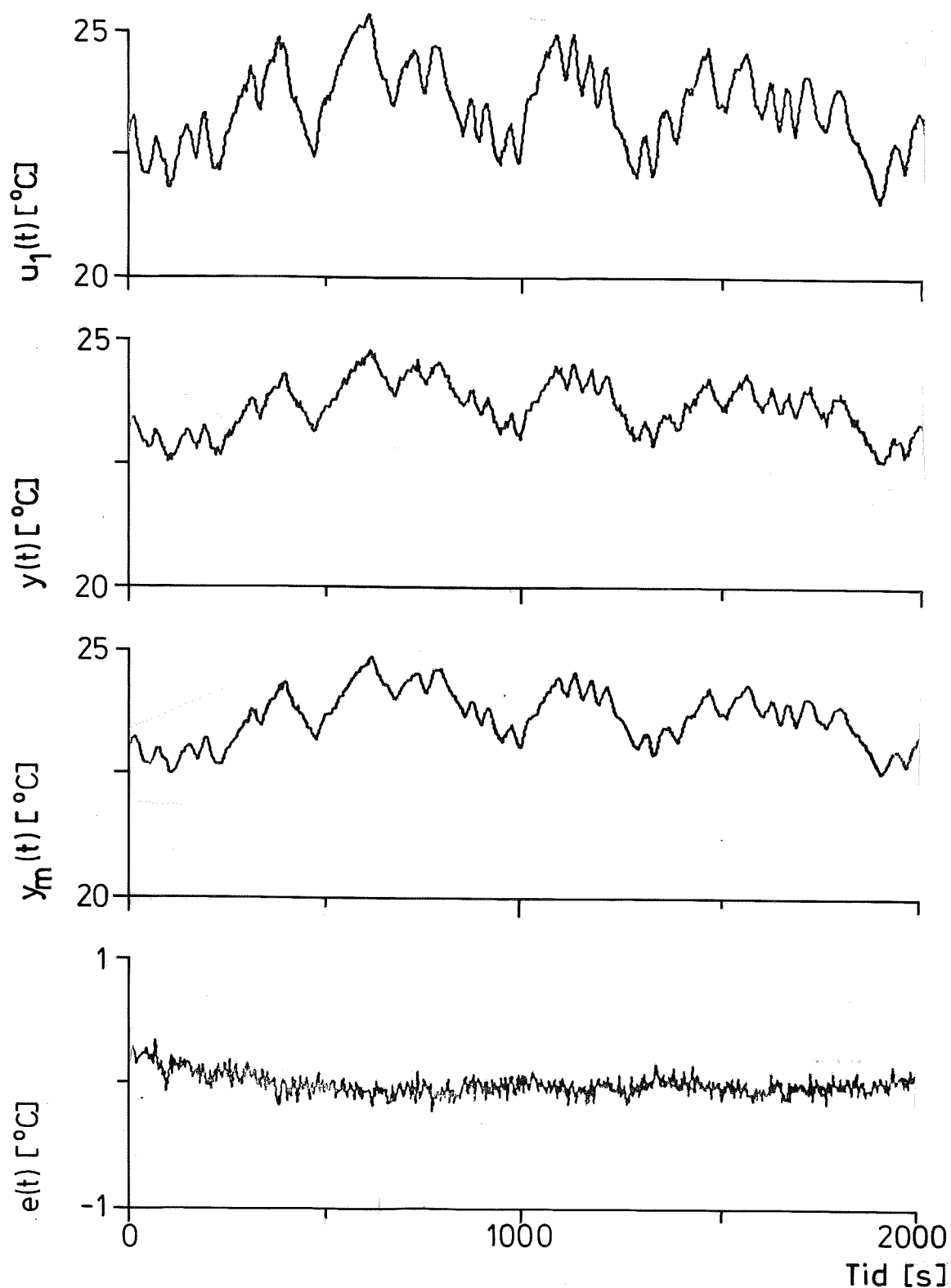


FIG 5.6 - Experiment med luftkanal. Störningsamplitud - minsta. Kurvorna är uppifrån ingående luftens temperatur  $u_1(t)$  i °C, uppmätt utgående lufttemperatur  $y(t)$  i °C, modellens utgående lufttemperatur  $y_m(t)$  i °C och felet  $e(t) = y(t) - y_m(t)$  i °C. Samplingsintervallet är 4 sekunder.

längd	20 m
diameter	0,4 m
plåttjocklek	0,0007 m
luftflöde	2800 m <sup>3</sup> /h

Om kanalluftens värmekapacitet  $C_1$  försummas och att värmeutbytet med omgivningen antas vara noll ( $h_y = 0$ ) så erhålls följande överföringsfunktion:

$$G(s) = \frac{cq}{(cq+Ah_i)} + \frac{Ah_i}{(cq+Ah_i)(sC(cq+Ah_i)/(cqAh_i) + 1)} \quad (5.9)$$

Överföringsfunktionen består av en direktterm  $K_1 = cq/(cq+Ah_i)$  och ett första ordningens system med förstärkningen  $K_2 = Ah_i/(cq+Ah_i)$  och med tidskonstanten  $T_2 = C(cq+Ah_i)/cqAh_i$ . Alla parametrar kan bestämmas lätt utom värmeövergångstalet  $h_i$ , som kan variera mellan 10 W/m<sup>2</sup> °C och 100 W/m<sup>2</sup> °C.

I detta fall har  $h$  satts till 50 W/m<sup>2</sup> °C. Med tidigare givna data för luftkanalen så blir

$$cq = 930 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

$$Ah_i = 1260 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

$$C = 63 \text{ kJ/}^\circ\text{C}$$

$$v = 6,2 \text{ m/s}$$

och modellparametrarna blir

$$K_1 = 0,42$$

$$K_2 = 0,58$$

$$T_2 = 120 \text{ s}$$

Summa av  $K_1$  och  $K_2$  är ett, vilket innebär att luftkanalen ej har några värmeförluster till omgivningen.

Då den approximativa modellen, ekvation (5.8), innehåller en direktterm så anpassades en första ordningens samplad modell med direktterm till mätdata. De erhållna kontinuerliga parametrarna finns återgivna i tabell 5.4.

Tabell 5.4 - Identifierade kontinuerliga modellparametrar för modell (5.8) för

Experiment	$K_1$	$T_1$ s	$K_2$	$T_2$ s
1	0,38	0,0	0,46	184
2	0,37	0,0	0,47	204
3	0,38	0,0	0,46	191

Experimenten 1, 2 och 3 har omfattat 516, 616 resp. 509 mätpunkter och samlingsintervallet har varit 60 s.

Den identifierade tidskonstanten  $T_2$  är ungefär 50% större än den från konstruktionsdata beräknade. Vidare är summan av  $K_1$  och  $K_2$  ej ett utan omkring 0,85 dvs luftkanalen har förluster på omkring 15%. Förhållandet mellan direkttermen  $K_1$  och förstärkningen  $K_2$  stämmer något så när överens (0,83 resp. 0,73).

Sammanfattningsvis kan sägas att en luftkanal kan beskrivas väl med en första ordningens modell med direktterm och att dessa modellparametrar kan beräknas approximativt från konstruktionsdata.

### 3. LUFTVÄRMARE

Luftvärmaren är en enkel värmeväxlare som används för att värma en luftström med hjälp av ett vattenflöde. En schematisk beskrivning visas i FIG 5.7. En utförlig beskrivning av fysikaliska modeller och en redogörelse för experimenten har presenterats i rapporten Jensen (1974b).

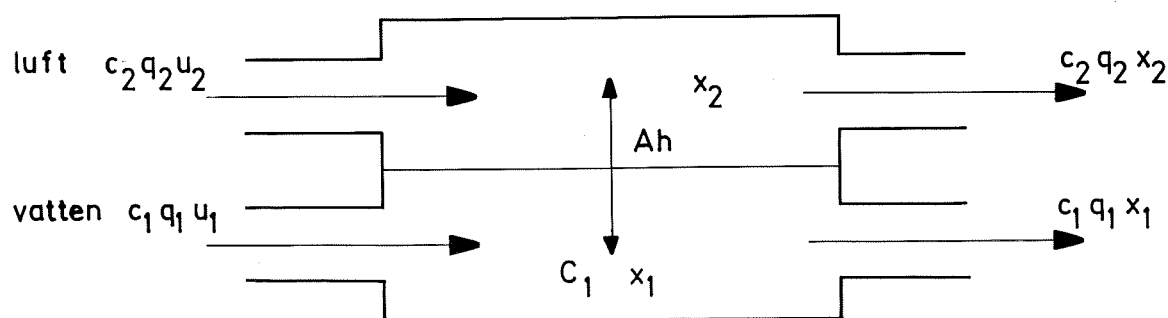


FIG 5.7 - En schematisk modell av en luftvärmare. Pilarna anger hur värmebytet sker.

Modellbygge

Med hjälp av modellen i FIG 5.7 så formuleras följande förenklade antagande:

1. Vatten och metallmassorna antas ha samma temperatur i hela värmaren.
2. Luftens temperatur antas vara konstant i hela värmaren.
3. Värmeutbytet mellan vatten-metallmassan och luftmassan i värmaren antas vara proportionellt mot temperaturskillnaden.
4. Värmekapaciteten för luftmassan i värmaren försummas.

Med dessa antaganden kan en värmebalansekvation ställas upp för luften och en för vatten-metallmassan i värmaren. Följande beteckningar används:

$x_1(t)$	vatten-metalltemperatur
$x_2(t)$	lufttemperatur
$u_1(t)$	inkommande vattentemperatur
$u_2(t)$	inkommande lufttemperatur
$q_1$	vattenmassflöde
$q_2$	luftmassflöde
$c_1$	värmekapacitet vatten
$c_2$	värmekapacitet luft
$C_1$	vatten-metall värmekapacitet
$Ah$	totala värmeövergångstalet mellan vatten-metall och luft.

Värmebalansekvationerna blir då med dessa beteckningar för vatten-metallmassan och luften

$$C_1 \dot{x}_1(t) = - (Ah + c_1 q_1) x_1(t) + Ah x_2(t) + c_1 q_1 u_1(t) \quad (5.10)$$

$$0 = Ah x_1(t) - (Ah + c_2 q_2) x_2(t) + c_2 q_2 u_2(t) \quad (5.11)$$

Dessa ekvationer är olinjära om flödena  $q_1$  och  $q_2$  används som insignaler. Vid tillfrån reglering av vattenflödet krävs två uppsättningar av ekvationer för att beskriva värmaren. I fortsättningen antas flödena  $q_1$  och  $q_2$  vara konstanta.

Den överföringsfunktion, som är av intresse, är den mellan inkommande vattentemperatur  $u_1(t)$  och utgående lufttemperatur  $x_2(t)$ . Överföringsfunktionen kan

beräknas till

$$G(s) = \frac{K}{sT + 1} \quad (5.12)$$

där

$$K = \left( 1 + \frac{c_2 q_2}{Ah} + \frac{c_2 q_2}{c_1 q_1} \right)^{-1} \quad (5.13)$$

$$T = \frac{c_1 (Ah + c_2 q_2)}{(Ah(c_1 q_1 + c_2 q_2) + c_1 q_1 c_2 q_2)} \quad (5.14)$$

Denna överföringsfunktion kan användas för att undersöka hur den statiska förstärkningen  $K$  och tidskonstanten  $T$  påverkas av vattenflödet  $q_1$ .

#### Luftvärmare nr 1

I samband med experiment med ett patientrum så erhöles en del mätdata på en eftervärmare som ingick i temperaturreglerkretsen. Försöken finns dokumenterade i Jensen (1974b).

Följande värden för en eftervärmare har använts:

$$\begin{aligned} c_1 &= 2600 \text{ J/}^{\circ}\text{C} \\ Ah &= 23 \text{ W/}^{\circ}\text{C} \\ c_1 q_{1\max} &= 93 \text{ W/}^{\circ}\text{C} \\ c_2 q_2 &= 57 \text{ W/}^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

Förhållandet  $K_1/K_{1\max}$  har beräknats som en funktion av flödeskvoten  $q_1/q_{1\max}$ . Kurvan i FIG 5.8 visar det välkända faktumet att lufttemperaturökningen över en värmare vid flödesreglering är en olinjär funktion av flödet.

Tidskonstanten  $T$  varierar i detta fall från 24 sekunder vid maximalt flöde till 3 minuter vid inget flöde. Detta visar att vid flödesreglering påverkas dynamiken av flödet. Uppvärmning sker betydligt snabbare än avkylning.

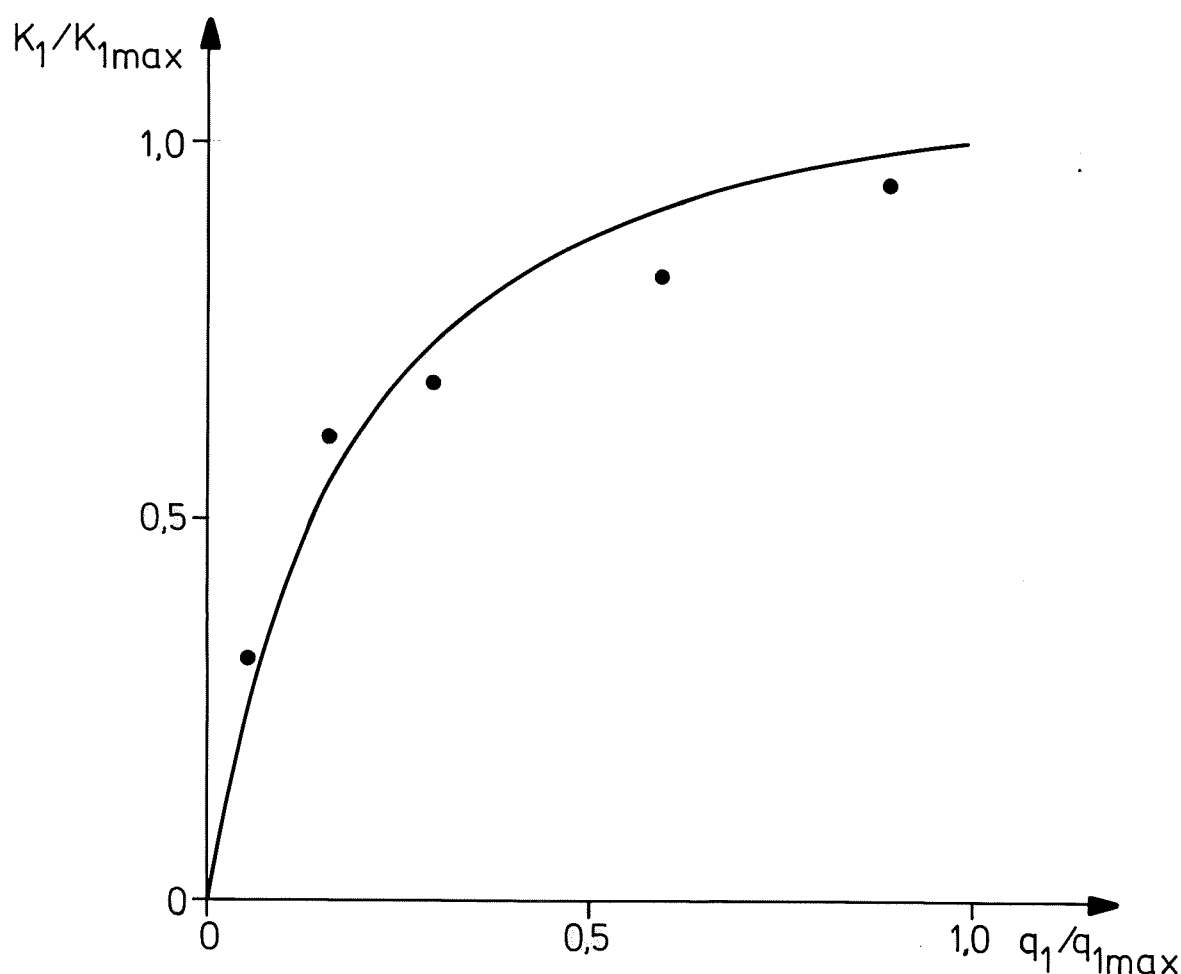


FIG 5.8 - Teoretiskt beräknade förstärknings- och experimentella värden som funktion av flödet.

Vid reglering av flödet med magnetventiler beror värmeuttaget på hur lång till-från-perioden är. Med en till-från-periodlängd, som är längre än uppvärmningstidskonstanten, kommer värmeuttaget att bli i stort sett proportionellt mot till-från-förhållandet. Vid en till-från-period kortare än uppvärmningstidskonstanten kan flödet approximeras som ett kontinuerligt flöde proportionellt mot det maximala flödet och till-från-förhållandet. Detta innebär nu att värmeuttaget följer den olinjära kurvan i FIG 5.8. Detta innebär att olinjäriteten kan delvis elimineras om det är möjligt att välja en lång period vid reglering med en pulslängdsmodulerad magnetventil.

Mätvärden från experiment med pulslängdsmodulerat vattenflöde och en maximal pulslängd på en minut har skalats och ritats in i FIG 5.8. Överensstämmelsen mellan modell och mätningar visar att en enkel modell kan användas för att få en god uppfattning om olinjäriteter hos processen.

En första ordningens samplad modell har bestämts med minsta kvadratmetoden och för de experimentella data som finns återgivna i FIG 5.9. I tabell 5.5 återges modellparametrarna  $a$  och  $b$ , den statiska förstärkningen  $g = b/(1+a)$  och residualernas rotmedelkvadrat  $\lambda$ . Det motsvarande kontinuerliga systemets tidskonstant varierar från 60 sekunder till 90 sekunder. Den identifierade tidskonstanten är en medeltidskonstant för den snabba tilltidskonstanten på 24 sekunder och den långsamma fråntidskonstanten på 3 minuter. Variationen hos den statiska förstärkningen stämmer också väl med de teoretiska beräkningarna. Periodtiden för det pulsade flödet under de 100 första tidpunkterna är omkring 12 minuter och detta flöde kan ej betraktas som ett kontinuerligt flöde, då eftervärmarens tidskonstant är mindre än 3 minuter. Modellens statiska förstärkning anger i detta fall den statiska förstärkningen vid maximalt flöde eller den maximala temperaturökningen över eftervärmaren.

Tabell 5.5 - Identifierade modellparametrar  $a$  och  $b$  för en eftervärmare, statisk förstärkning  $g = b/(1+a)$  och residualernas rotmedelkvadrat  $\lambda$  för några olika delar av ett experiment.

Identifieringsdata från tidpunkt till tidpunkt		Modellparametrar			
		$a$	$b$ °C	$g$ °C	$\lambda$ °C
1	100	-0,41	0,67	11,3	2,1
101	200	-0,51	1,71	35,0	0,35
201	300	-0,53	0,59	12,5	0,47

Modeller för värmare eller kylare med temperaturreglering kan härledas från den aktuella eftervärmaremodellen. Den aktuella modellen kan även modifieras så att den gäller för ett elbatteri. Den massa som tar del i värmeöverföringen till luften är ej enbart själva värmarespiralerna utan även de omgivande kanalväggarna deltar i värmeöverföringen till luften.

Värmeelektroderens höga temperatur medför att värmeöverföringen även sker indirekt till luften via strålning till kanalväggarna och därefter via konvektion till luften.

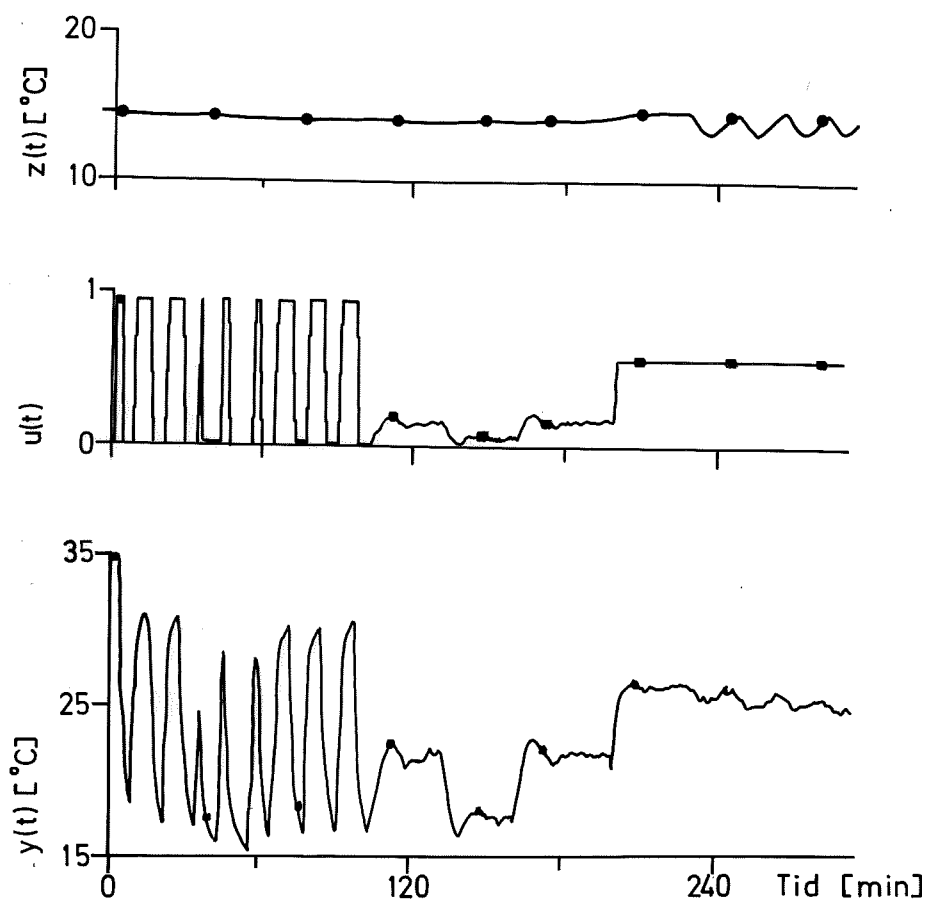


FIG 5.9 - Experiment med eftervärmare. Samplingsintervallet är 1 minut. Lufttemperaturen efter eftervärmaren i  $^{\circ}\text{C}$  betecknas  $y(t)$  och temperaturen före  $z(t)$ . Till-från-förhållandet betecknas med  $u(t)$ .

### Luftvärmare nr 2

För att visa att den använda approximativa modellen även kan användas för andra värmare, skall här göras en jämförelse mellan den dominerande tidskonstanten och den statiska förstärkningen för experimentellt bestämda modeller och en från konstruktionsdata bestämd modell. I modellen är som tidigare insignal vattentemperatur före värmaren och utsignal är lufttemperatur efter värmaren.



Mätningar och experimentella modeller finns dokumenterade i Jensen (1971). Den dominerande tidskonstanten ligger i tidsområdet 10-20 sekunder och den statiska förstärkningen är omkring 0,5.

För att kunna beräkna tidskonstant och förstärkning från konstruktionsdata, måste vattenmetallmassans värmekapacitet  $C$ , värmeöverföringskapaciteten mellan vatten-luft  $Ah$ , vattnets massflöde  $q_1$  och luftens massflöde  $q_2$  beräknas. Enkla beräkningar och uppskattningar ger

$$C = 37000 \text{ Joule/}^{\circ}\text{C}$$

$$Ah = 1700 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$$

$$c_1 q_1 = 3400 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$$

$$c_2 q_2 = 1400 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$$

Med ekvationerna (5.13) och (5.14) så blir förstärkningen 0,45 och tidskonstanten 9 s. Detta resultat visar att den enkla modellen ligger ganska nära de viktiga värdena.

#### Plattvärmväxlare vatten-vatten

Att ytterst enkla modeller kan användas för att uppskatta dynamiken visar följande exempel med en plattvärmväxlare. Några dynamiska modeller för en plattvärmväxlare (vatten-vatten) har beräknats från experimentella data av Lundström och Nilsson (1971). De experimentellt bestämda modellerna visade att den aktuella plattvärmväxlaren är en mycket snabb process. Tidskonstanterna ligger i området 1-2 sekunder. För en enkel andra ordningens modell, vilken innehöll två lika stora värmekapaciteter för vattenmassorna på primär- resp. sekundärsidan, erhöles en tidskonstant på 0,7 sekunder och en på 4 sekunder. Den experimentellt uppskattade tidskonstanten ligger alltså mellan de teoretiskt beräknade.

#### 4. ENTALPIVÄXLARE

En entalpiväxlare, FIG 5.10, är en värmeväxlare som kan växla entalpi mellan två luftströmmar. Luftströmmarna passerar var sin halva av en rotor med axiella kanaler. Rotormaterialet är hygroskopiskt och kan därför även överföra vatten mellan de två luftströmmarna. Värmeutbytet mellan luftströmmarna sker genom att rotorn roterar. Ett segment av rotorn är således omväxlande i den ena resp. den andra luftkanalen. Verkningsgraden är en olinjär funktion av varvtalet. De två luftströmmarna är i regel uteluft och returluft. Returluften förhindras att åter komma in i byggnaden genom att rotorn måste passera en renblåsningssektor mellan returluftsektorn och uteluftsektorn.

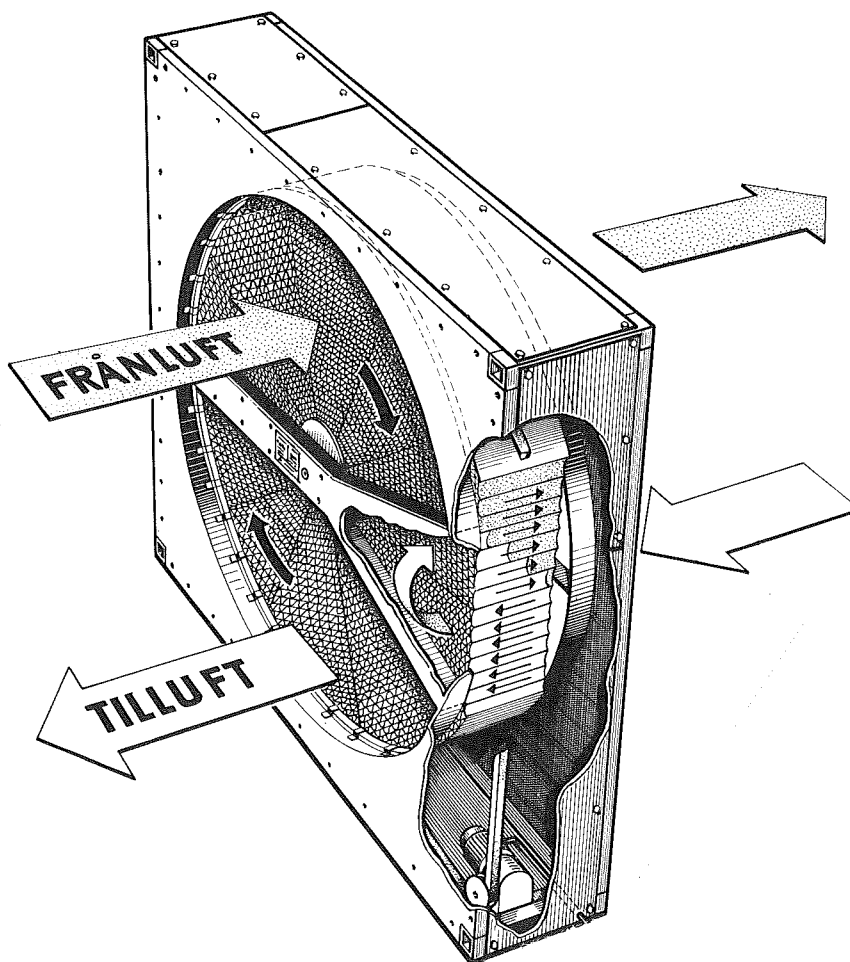


FIG 5.10 - Sprängskiss av en entalpiväxlare.

Innehållet i detta avsnitt återfinns också i Jensen (1974a).

I fortsättningen kommer entalpiväxlaren att endast betraktas som en temperaturväxlare utan förmåga att överföra vatten mellan luftströmmarna.

### Fysikaliska modeller

En entalpiväxlare kan beskrivas som en radiellt och axiellt distribuerad värmekapacitet som roterar mellan två luftströmmar. Matematiskt kan entalpiväxlaren beskrivas med en partiell differentialekvation. I en modell så måste den väsentliga egenskapen ingå, nämligen ett variabelt värmefflöde mellan de två luftströmmarna. En enkel modell som har denna egenskap är en tvåkammarmodell, FIG 5.11. I denna motsvarar de två kamrarna de två luftflödeshalvorna. Mellan de två kamrarna cirkulerar ett variabelt flöde, som är proportionellt mot rotationen. Igenom varje kammare passerar ett flöde, vilket motsvarar uteluftflödet och returluftflödet för den ena resp. den andra kammaren.

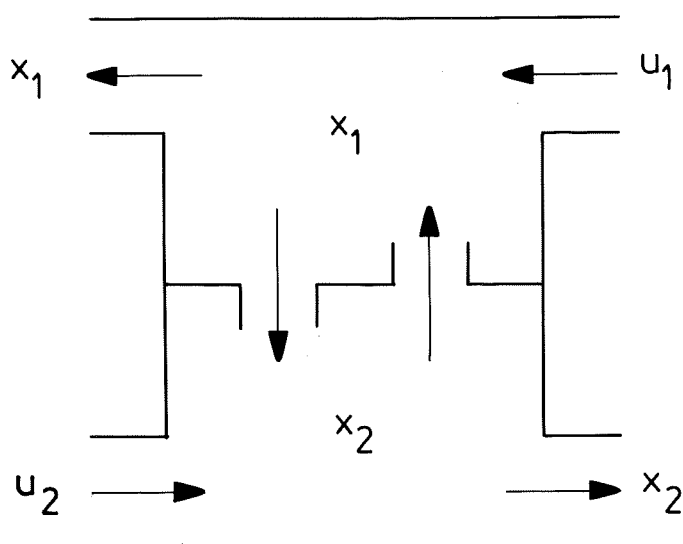


FIG 5.11 - En tvåkammarmodell av en entalpiväxlare.

Tvåkammarmodellen baseras på följande antagande:

1. Luften och rotormassan har samma temperatur överallt i uteluftsektorn.
2. Luften och rotormassan har samma temperatur överallt i returluftsektorn.
3. Renblåsningssektorn försummas.
4. Värmeutbytet mellan uteluft- och returluftsektorn är proportionellt mot temperaturskillnaden mellan dessa och varvtalet.
5. Värmeutbytet mellan uteluft och uteluftsektorn är proportionellt mot temperaturskillnaden.
6. Värmeutbytet mellan returluft och returluftsektorn är proportionellt mot temperaturskillnaden.

Följande beteckningar kommer att användas:

$x(t)$	medeltemperatur uteluftsektor
$y(t)$	medeltemperatur returluftsektor
$u_1(t)$	temperatur uteluft
$u_2(t)$	temperatur returluft
$u_3(t)$	rotorhastighet [varv/s]
$C$	värmekapacitet hos en halva av rotorn [J/K]
$q$	uteluftflöde [kg/s] och returluftflöde [kg/s]
$c$	luftens värmekapacitet [J/kg K]

De två värmebalansekvationerna fås enkelt som

$$C\dot{x}(t) = c q (u_1(t) - x(t)) + 2Cu_3(t)(y(t) - x(t)) \quad (5.15)$$

$$C\dot{y}(t) = c q (u_2(t) - y(t)) + 2Cu_3(t)(x(t) - y(t)) \quad (5.16)$$

För att kunna använda modellen ovan så måste förhållandet mellan  $C$  och  $cq$  bestämmas. Både  $c$  och  $q$  är kända, medan rotorhalvans värmekapacitet  $C$  är svårbestämd.

Vid maximalt varvtal, 10 varv/s, så är verkningsgraden omkring 0,75. Denna information kan användas för att beräkna det sökta förhållandet mellan  $cq$  och  $C$ . Det är uppenbart att den enkla tvåkammarmodellens verkningsgrad högst kan bli 0,5. Om flera tvåkammarmodeller kopplas i kaskad, så blir verkningsgraden större än 0,5. Om antalet tvåkammarmodeller är  $n$ , så blir ekvationen för delrotorn i följande:

$$C\dot{x}_i(t) = ncq(x_{i-1}(t) - x_i(t)) + 2Cu_3(t)(y_i(t) - x_i(t)) \quad (5.17)$$

$$C\dot{y}_i(t) = ncq(y_{i+1}(t) - y_i(t)) + 2Cu_3(t)(x_i(t) - y_i(t)) \quad (5.18)$$

Efter övergång i limes så erhålls följande par av partiella differentialekvationer. Argumenten  $t$  och  $\ell$  har utelämnats.

$$\frac{\partial x}{\partial t} = -\alpha \frac{\partial x}{\partial \ell} + 2u_3(y-x) \quad (5.19)$$

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \alpha \frac{\partial y}{\partial \ell} + 2u_3(x-y) \quad (5.20)$$

$$\alpha = cq\ell/C$$

Rotorns längd är  $\ell$  (i axiell led). I det stationära fallet så fås

$$\frac{\partial x}{\partial \ell} = \frac{2u_3}{\alpha} (y-x) \quad (5.21)$$

$$\frac{\partial y}{\partial \ell} = \frac{2u_3}{\alpha} (y-x) \quad (5.22)$$

Om ekvation (5.21) subtraheras med ekvation (5.22) så fås

$$\frac{\partial}{\partial \ell}(x-y) = 0 \quad (5.23)$$

Detta innebär att

$$x - y = \text{konstant} = k_1 \quad (5.24)$$

Temperaturen hos de utgående luftflödena kan beräknas till följande:

$$x(\ell) = 2k_1 u_3 \ell / \alpha + k_2 \quad (5.25)$$

$$y(\ell) = 2k_1 u_3 \ell / \alpha + k_3 \quad (5.26)$$

Verkningsgraden  $v$  kan skrivas som

$$\begin{aligned} v &= \frac{x(\ell) - x(0)}{y(\ell) - x(0)} = \frac{x(\ell) - x(0)}{y(\ell) - x(\ell) + x(\ell) - x(0)} = \\ &= \frac{2k_1 u_3 \ell}{\alpha k_1 + 2k_1 u_3 \ell} = \frac{2u_3 \ell}{\alpha + 2u_3 \ell} = \frac{u_3}{u_3 + \alpha/(2\ell)} \end{aligned} \quad (5.27)$$

Den sökta parametern  $\alpha$  kan skrivas som

$$\alpha = \frac{2u_3(1-v)}{v} \ell \quad (5.28)$$

och med data vid maximalt varvtal så fås det sökta förhållandet mellan  $cq$  och  $C$  som

$$\frac{cq}{C} = \frac{\alpha}{\ell} = \frac{1}{9}$$

dvs

$$9cq = C \quad (5.29)$$

Hur beror verkningsgraden i stationärt tillstånd på varvtalet  $u_3(t)$ ? Denna fråga kan besvaras genom att beräkna verkningsgraden  $v(t)$  som  $x(t)$  genom att sätta  $\dot{x}(t) = \dot{y}(t) = u_1(t) = 0$  och  $u_2(t) = 1$ . Verkningsgraden  $v(t)$  definieras som

$$v(t) = \frac{x(t) - u_1(t)}{u_2(t) - u_1(t)} \quad (5.30)$$

med de gjorda antagandena fås

$$v(t) = x(t) = 18u_3(t)/[36u_3(t) + 1] \quad (5.31)$$

Verkningsgraden för den aktuella modellen kan ej överstiga 0,5. I den verkliga processen sker värmeutbyte som i en motströmsvärmväxlare. Uteluften och returluften genomströmmar rotorn från varisitt håll. I den aktuella modellen finns det inget som indikerar genomströmningsriktningen. Om två kammarmodeller kopplas i kaskad, då kan motströmsegenskapen byggas in i modellen. Detta innebär att rotorn delas i två rotorerna med halva tjockleken. Rotationsvärme-flödet blir nu  $Cu_3(t)/2$  per rotor och dess värmekapacitet blir  $C/2$  per rotor och uteluft- eller returluftsektor. I FIG 5.12 finns en schematisk bild av hur den modifierade modellen kommer att vara utformad. Den statiska verkningsgraden kan nu ej överstiga  $2/3$ . I FIG 5.13 har verkningsgraden återgetts som en funktion av varvtalet och för olika antal kammarmodeller kopplade i kaskad.

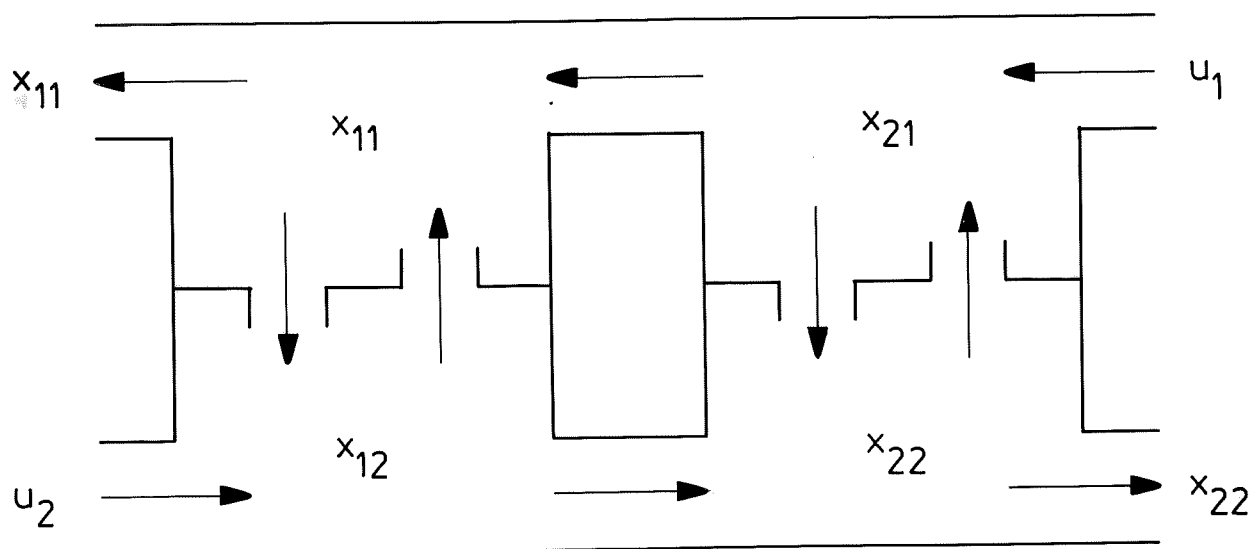


FIG 5.12 - Kaskadkoppling av två kammarmodeller. Detta motsvarar att rotorn delas i två rotorerna som kopplas i kaskad.

Den lokala statiska förstärkningen kan beräknas för modellen med två kamrar genom att derivera verkningsgraden med avseende på varvtalet.

$$\frac{dv}{du_3} = \frac{18}{(36u_3+1)^2} \quad (5.32)$$

Den lokala förstärkningen varierar med en faktor 49 från högsta till lägsta varvtal.

Den lokala förstärkningen för den distribuerade modellen kan också beräknas genom att derivera uttrycket för verkningsgraden.

$$v(u_3) = \frac{18u_3}{1 + 18u_3} \quad (5.33)$$

$$\frac{dv}{du_3} = \frac{18}{(1+18u_3)^2} \quad (5.34)$$

I detta fall så varierar den totala förstärkningen en faktor 16.

En annan fråga som är av intresse är: Vilken är den dominerande tidskonstanten och hur påverkas den av varvtalet? Den frågan kan besvaras genom att undersöka egenvärdena till matrisen A som härrör från kammarmodellen (ekvationerna 5.15 och 5.16).

$$A = \begin{pmatrix} -2u_3 - cq/C & 2u_3 \\ 2u_3 & -2u_3 - cq/C \end{pmatrix}$$

Egenvärdena blir med  $C = 9cq$

$$\lambda_1 = -1/9$$

$$\lambda_2 = -1/9 - 4u_3$$

Modellens tidskonstanter är då alltid lika med eller mindre än 9 sekunder.



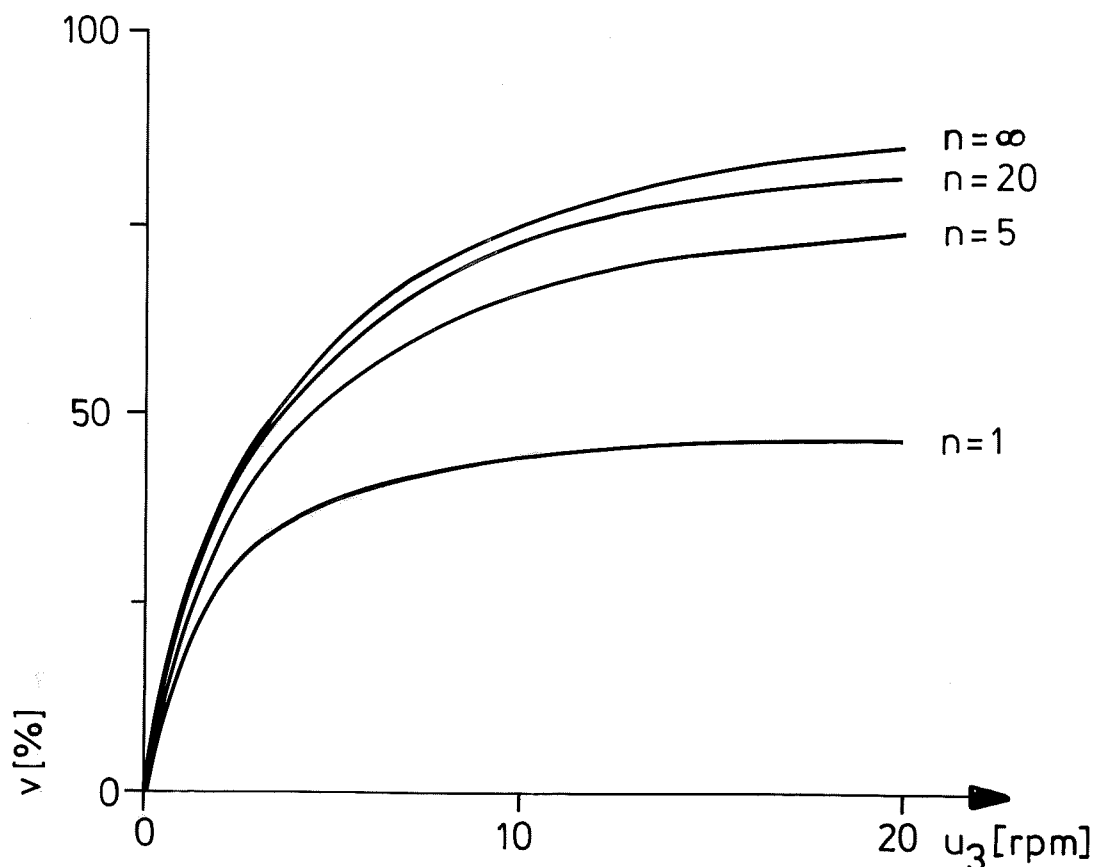


FIG 5.13 - Beräknad verkningsgrad  $v$  som funktion av varvtalet och antal rotorskivor  $n$ .

#### Experimentell bestämning av verkningsgrad

Temperaturverkningsgraden har bestämts för 25 olika värden på varvtalet. Varvtalet hölls konstant under 15 minuter. Datainsamling skedde var 20:e sekund. Hela experimentet återges i FIG 5.14. Av de 45 mättidpunkterna som erhöles för varje varvtalsnivå användes 20 från det 21:a till det 40:e för att beräkna verkningsgraden. Tre temperaturer uppmättes, nämligen uteluftens  $u_1$ , returluftens  $u_2$  och uteluftens efter entalpiväxlaren  $y$ . Den senare är ett medelvärde av tre temperaturgivare. Detta är nödvändigt, då det finns stora temperaturvariationer i kanaltvärsnittet efter entalpiväxlaren.

Resultat finns återgivet i tabell 5.6 tillsammans med de uppmätta temperaturerna  $u_1$ ,  $u_2$  och  $y$  och det uppmätta varvtalet  $u_3$ .

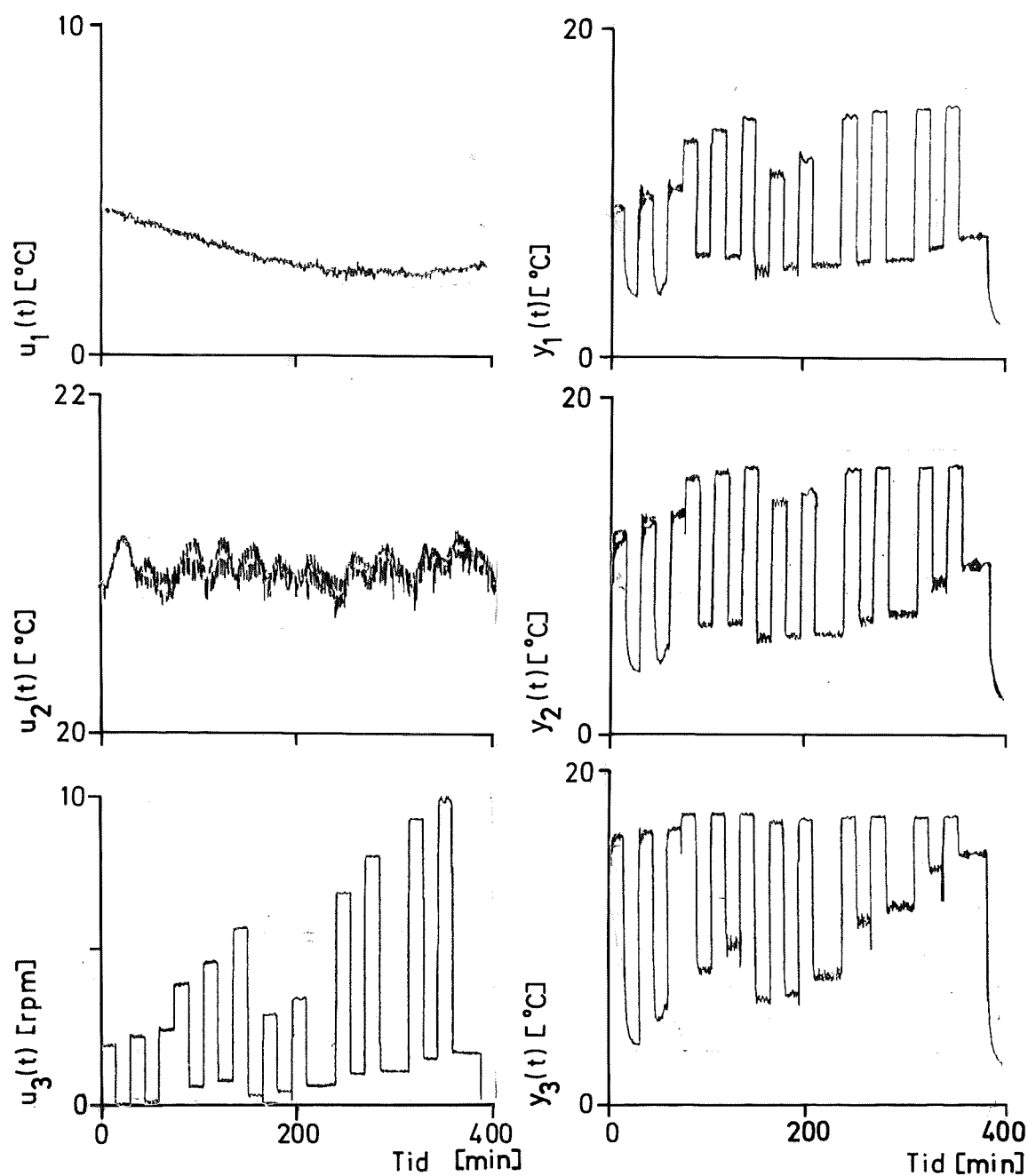


FIG 5.14 - Uppmätta temperaturer och varvital från ett experiment för bestämning av temperaturverkningsgraden som funktion av varvtalet.  $u_1(t)$  är utelufttemperatur i  $^{\circ}\text{C}$ .  $u_2(t)$  är returlufttemperatur i  $^{\circ}\text{C}$ .  $u_3(t)$  är uppmätt varvtal i rpm.  $y_1(t)$ ,  $y_2(t)$  och  $y_3(t)$  är utelufttemperatur efter entalpiväxlare i  $^{\circ}\text{C}$ .

Tabell 5.6 - Beräknade medelvärden för

$u_1(t)$  utelufttemperatur i  $^{\circ}\text{C}$   
 $u_2(t)$  returlufttemperatur i  $^{\circ}\text{C}$   
 $u_3(t)$  uppmätt varvtal i rpm  
 $u_4(t)$  önskat varvtal i rpm  
 $y(t)$  utelufttemperatur efter entalpiväxlare i  $^{\circ}\text{C}$   
 $v(t)$  verkningsgrad i %

för experimentet i FIG 5.14.

$u_1(t)$ $^{\circ}\text{C}$	$u_2(t)$ $^{\circ}\text{C}$	$u_3(t)$ rpm	$u_4(t)$ rpm	$y(t)$ $^{\circ}\text{C}$	$v(t)$ %
4.80	21.00	1.73	1.57	13.01	50.64
4.63	21.21	0.00	0.00	4.96	1.97
4.48	21.01	1.96	1.79	13.62	55.33
4.43	21.00	0.07	0.09	5.76	8.01
4.24	20.93	2.16	1.98	14.02	58.60
4.13	21.07	3.45	3.49	15.88	69.37
4.05	21.10	0.51	0.48	7.88	22.46
3.87	21.04	4.08	3.97	16.20	71.82
3.79	21.11	0.68	0.58	8.42	26.75
3.63	21.05	5.06	4.97	16.49	73.87
3.49	21.09	0.25	0.19	6.82	18.94
3.42	21.00	2.57	2.47	14.64	63.80
3.36	21.03	0.35	0.28	7.05	20.87
3.25	20.97	3.01	2.98	15.23	67.58
3.26	21.02	0.51	0.38	7.45	23.62
3.09	20.94	0.52	0.67	7.49	24.66
3.07	20.93	6.06	5.99	16.48	75.09
3.12	21.06	0.86	0.77	8.87	32.07
3.02	21.03	7.12	6.98	16.64	75.62
3.10	21.11	0.93	0.89	9.30	34.41
3.12	21.01	0.93	0.99	9.30	34.58
3.02	21.00	8.17	7.98	16.70	76.09
3.08	21.09	1.28	1.18	10.90	43.43
3.13	21.08	8.74	8.97	16.80	76.15
3.17	21.15	1.46	1.38	11.70	47.44
3.28	21.09	1.45	1.57	11.76	47.65
3.26	21.02	0.00	0.00	3.79	2.95
3.24	20.92	1.93	1.79	13.05	55.51
3.45	20.99	0.06	0.09	5.34	10.77
3.74	20.96	2.07	1.98	13.84	58.68

I FIG 5.15 har verkningsgraden uppritats som en funktion av det uppmätta varvtalet  $u_3$ . Två teoretiska kurvor för verkningsgraden enligt ekv (5.33) och med  $C = 9\text{c}q$  och  $C = 18\text{c}q$  har lagts in. Den beräknade kurvan med  $C = 9\text{c}q$  stämmer ej särskilt väl överens med uppmätta data. Om rotorns värmekapacitet dubblas ( $C = 18\text{c}q$ ) så blir överensstämmelsen bättre. En dubbling av rotorns värmekapacitet medför att verkningsgraden ökar från 0.75 till 0.84. Den uppmätta verkningsgraden är större än den beräknade för  $C = 18\text{c}q$  vid låga varvtal och tvärtom vid höga varvtal. En förklaring är att entalpiväxlaren kan avfukta uteluften främst vid låga varvtal. Det frigjorda ångbildningsvärmets och lösningsvärmets frigörs och tillförs delvis uteluften i rotorn.

Detta fenomen framgår av både mätdata i FIG 5.15 och tabell 5.6. I andra experiment som beskrivs i kapitel 7 avsnitt 6 erhöles högre verkningsgrader vid motsvarande varvtal. Vattenbalansen i rotorn och i de två luftflödena har ej tagits med i modellen, vilket orsakar skillnaden mellan uppmätt och beräknad verkningsgrad.

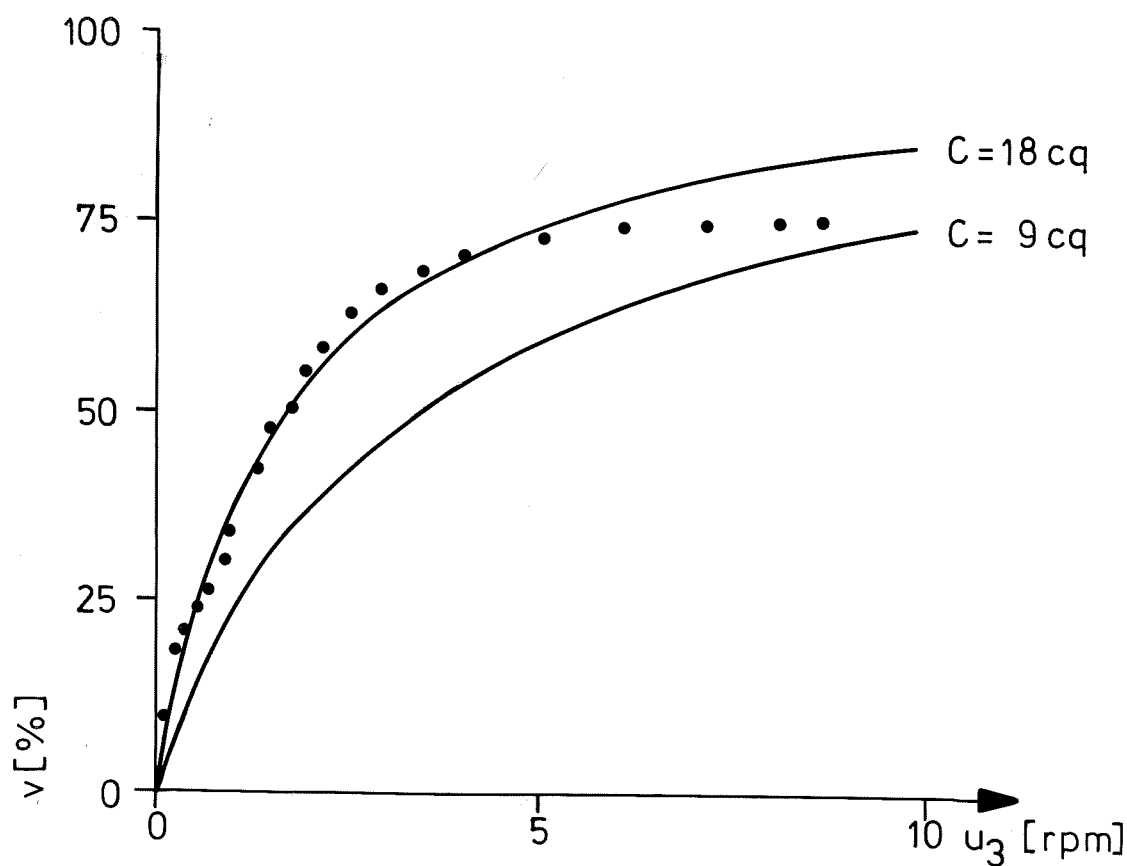


FIG 5.15 - Uppmätt temperaturverkningsgrad  $v$  som funktion av varvtalet  $u_3$  för experimentet i FIG 5.14.

### Experimentell bestämning av dynamiken

För att kunna bestämma dynamiska modeller för entalpiväxlaren har ett speciellt experiment utförts. På sex olika varvtalsnivåer har det önskade varvtalet varierats enligt lämplig signalsekvens (PRBS). Datainsamling skedde var 20:e sekund. Antal data per varvtalsnivå var 225.

Det uppmätta varvtalet  $u_3(t)$  och de fem olika temperaturerna redovisas i FIG 5.16.

Dynamiken från utelufttemperaturen  $u_1(t)$ , returlufttemperaturen  $u_2(t)$  och uppmätt varvtal  $u_3(t)$  till utsignalen uteluftens temperatur efter växlaren  $y(t)$  har bestämts för några olika modeller, som ges av följande generella modell.

$$y(t) + ay(t-1) = b_1u_1(t-1) + b_2u_2(t-1) + b_3u_3(t-1) + e(t)$$

Parametrarna  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  har bestämts med hjälp av minsta kvadratmetoden. Resultat återges för två av modellerna i tabell 5.7. Den lokala statiska förstärkningen mellan insignalen  $u_3(t)$  (varvtal) och utsignalen  $y(t)$  (utelufttemperatur efter växlare) har också beräknats.

De numeriska värdena på parametern  $a$  visar att dynamiken är snabb. I de flesta fall är storleken på parametern  $a$  mindre än 0,5 vilket motsvarar en tidskonstant på 30 s. Observera att samplingsintervallet vid experimentet var 20 s. Kortare samplingsintervall kunde inte uppnås med experimentutrustningen. Dynamiken hos entalpiväxlaren är således mycket snabb i förhållande till dynamiken hos många andra klimatprocesser.

Den lokala statiska förstärkningen ökar genomgående med minskande varvtal från 0,4 °C/rpm till 5 °C/rpm. Ett undantag är att förstärkningen är omkring 2 °C/rpm för det lägsta varvtalet. En trolig förklaring till denna avvikelse är att den uppmätta utsignalen har haft ett litet signalbrusförhållande. Modellanpassningen har då i stort sett skett så att endast medelvärdet blivit det rätta medan dynamikparametrarna är mycket osäkra.

Tabell 5.7 - Första ordningens modellparametrar och förstärkning  $g$  för olika modeller och olika varvtalsnivåer och amplituder för experimentet i FIG 5.16.

mv. rpm	ampl. rpm	Modellparametrar					$g = b_3/(1-a)$ $^{\circ}\text{C}/\text{rpm}$
		$a$	$b_3$ $^{\circ}\text{C}/\text{rpm}$	$b_2$	$b_1$		
0.5	0.2	-0.429	1.001	-	-		1.75
		-0.325	1.574	-0.101	-0.489		2.34
0.85	0.15	-0.608	2.054	-	-		5.24
		-0.548	2.089	0.035	0.651		4.73
1.25	0.25	-0.860	0.163	-	-		1.16
		-0.327	1.357	0.596	0.210		2.01
1.75	0.25	-0.219	1.302	-	-		1.66
		-0.220	1.363	-0.096	0.036		1.75
2.50	0.50	-0.280	0.849	-	-		1.18
		-0.070	1.130	0.294	-0.166		1.21
4.0	1.0	-0.532	0.207	-	-		0.44
		-0.138	0.340	0.327	0.407		0.39

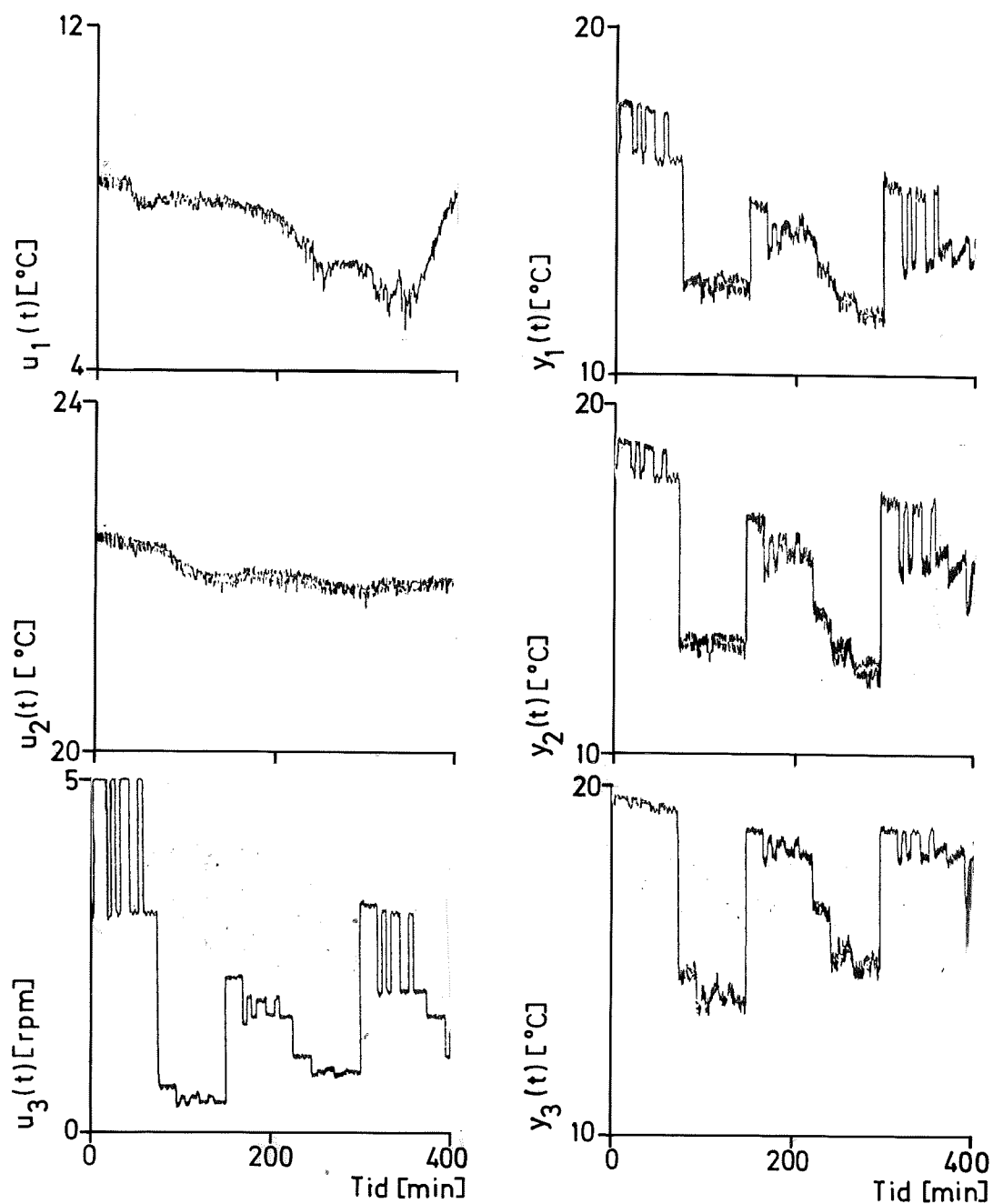


FIG 5.16 - Uppmätta temperaturer och varvtal från ett experiment för bestämning av dynamiska egenskaper för olika varvtalsnivåer.  $u_1(t)$  är utelufttemperatur i °C.  $u_2(t)$  är returlufttemperatur i °C.  $u_3(t)$  är uppmätt varvtal i rpm.  $y_1(t)$ ,  $y_2(t)$  och  $y_3(t)$  är uteluftens temperatur efter entalpiväxlaren i °C.

## 5. BOSTADSOMRADE UTETEMPERATUR - FJÄRRVÄRMEEFFEKT

I detta avsnitt beskrivs en enkel modell för att prediktera fjärrvärmeeffekten timme för timme för ett bostadsområde, som en funktion av utetemperatur, veckodag och tid på dygnet. Egentligen borde också utetemperaturen predikteras, men detta har ej gjorts. Avsikten med modellen är främst att visa hur en okänd delvis periodisk störning kan modelleras, nämligen tappvarmvattenförbrukningen. En annan periodisk förbrukning är nattsänkningen och/eller morgonhöjningen. I de tidigare modellerna har alla insignaler varit kända. Avsnittet finns också dokumenterat i Jensen (1973c).

### Modellbygge

Fjärrvärmets används för uppvärmning, ventilation och tappvarmvatten. De två förstnämnda värmeuttagen kan förväntas vara i stort sett proportionella mot inne-utetemperaturdifferensen. Något som förstärker detta beroende är att framledningstemperaturen till radiatorerna i de flesta fall regleras efter utetemperatur och någon given reglerkurva. En god ansats är då att anta att uppvärmning och ventilationseffekten är proportionell mot utetemperaturen. Innetemperaturens variation antas vara försumbar.

Nu kvarstår att beskriva tappvarmvatteneffekten. En god ansats är att anta att den är periodisk. Periodiciteten kan utformas på flera sätt t.ex. alla veckans timmar är olika eller alla dygnets timmar är olika. I det ena fallet beskrivs periodiciteten med 168 (7·24) parametervärden och i det senare fallet med 24 parametervärden.

Modellen kan skrivas som

$$y_m(t) = au(t) + p(t) \quad (5.35)$$

Här är

$y_m(t)$  modellens fjärrvärmeeffekt

$u(t)$  uppmätt utetemperatur

$p(t)$  periodiciteten

$a$  parametern för utetemperaturens inverkan



### Bostadsområdet

Den här beskrivna modellen har anpassats till mätdata från kv. Stadinge i Tensta som består av sex byggnader med 113 lägenheter. Mätningarna har utförts av byggnadsenergigruppen och dokumenterats i byggnadsenergigruppen (1974). Uppvärmningen sker med ett fjärrvärmeanslutet radiatorsystem. Byggnaderna ventileras med ett FT-system (fläktstyrda från- och tilluftflöden). Värmesystemet består av en shuntgrupp, gemensam för radiatorer och varmluftapparater för uppvärmning av tilluften. Värmeeffektbehovet är beräknat för DIT (dimensionerande innetemperatur) = 20 grader och DUT (dimensionerande utetemperatur) = -20 grader. Temperaturen i kryprummen har antagits vara 10 grader och i källarlokalerna 20 grader. Det beräknade totala värmeeffektbehovet för transmission och ventilation uppgår till 772 kW för de sex byggnaderna, vilket motsvarar 19 kW/grad.

Temperaturregleringen sker centralt från abonnentcentralen. Framledningstemperaturen regleras i förhållande till utetemperaturen efter en inställd reglerkurva. Varmluftapparaterna är anslutna till radiatorsystemet och är alltså förshuntade. För efterreglering av tilluftstemperaturen är varje varmluftapparat försedd med en självverkande ventil styrd av en temperaturgivare i tilluftskanalen.

### Modellanpassning och resultat

Modellparametrarna har bestämts med minsta kvadratmetoden. Genom att välja periodiciteten lämpligt så kan modellparametrarna erhållas genom att lösa ett ekvationssystem direkt. Ingen matrisinvertering krävs.

Periodiciteterna som har anpassats är alla veckans timmar lika ( $n=2$ ), alla dygnets timmar olika ( $n=25$ ) och veckans alla timmar olika ( $n=169$ ). I FIG 5.17 - 5.19 redovisas uppmätt fjärrvärmeeffekt, modellens fjärrvärmeeffekt och felet. Modellparametrarna har anpassats till veckorna före den vecka som redovisas och därefter har fjärrvärmeeffekten beräknats med de givna modellparametrarna och med den uppmätta utetemperaturen.

Att använda endast två parametrar dvs att anta att periodiciteten är konstant, ger dåligt resultat. Skillnaden mellan alla dygnets timmar olika och alla veckotimmar olika framgår bäst kring lördag och söndag.

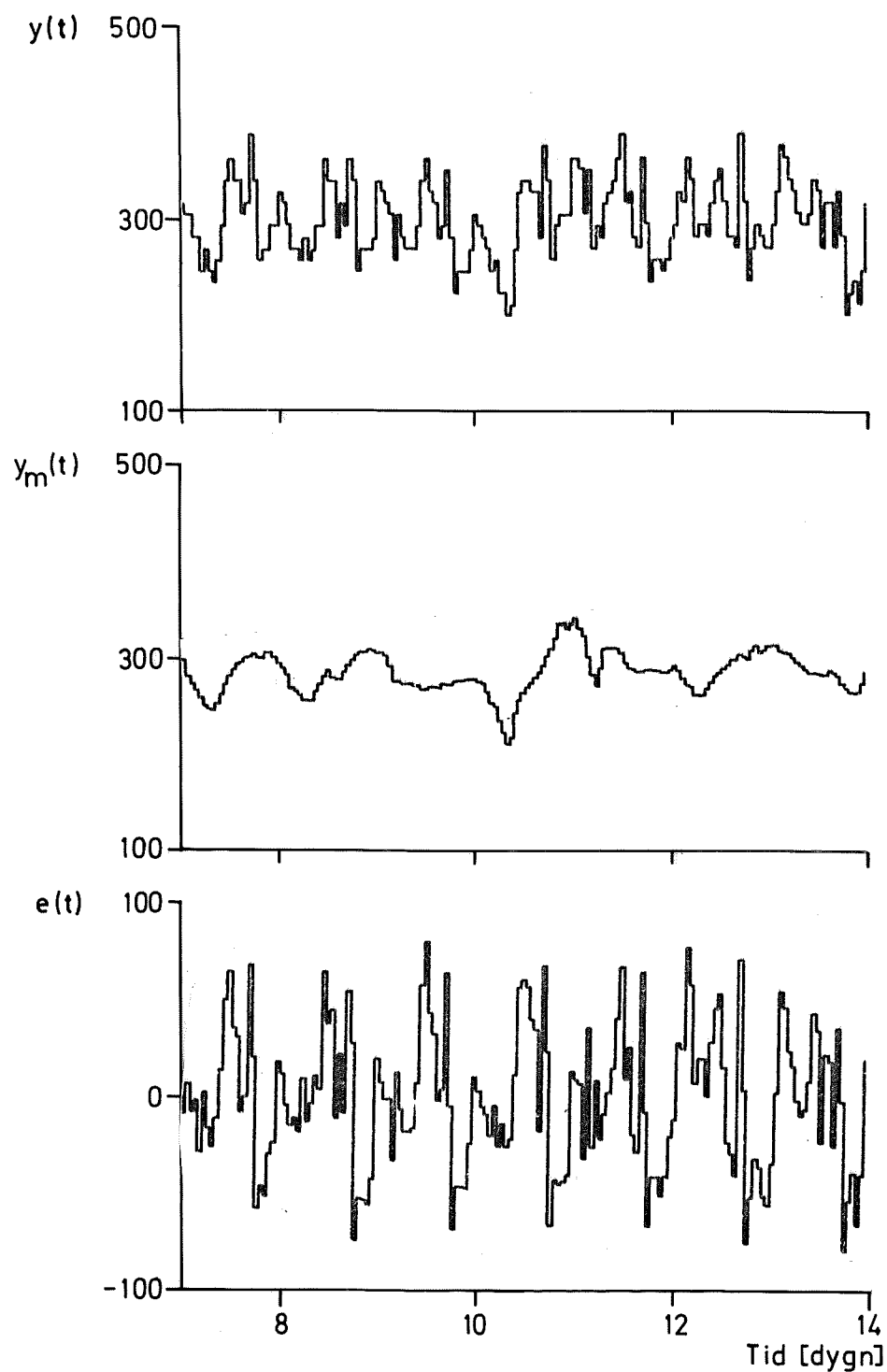


FIG 5.17 - Uppmätt fjärrvärmeeffekt  $y(t)$  i kW, modellens  $y_m(t)$  i kW och felet  $e(t) = y(t) - y_m(t)$  i kW för en modell med 2 parametrar. Det första predikterade dygnet är en måndag och dygnet börjar kl. 07.00.

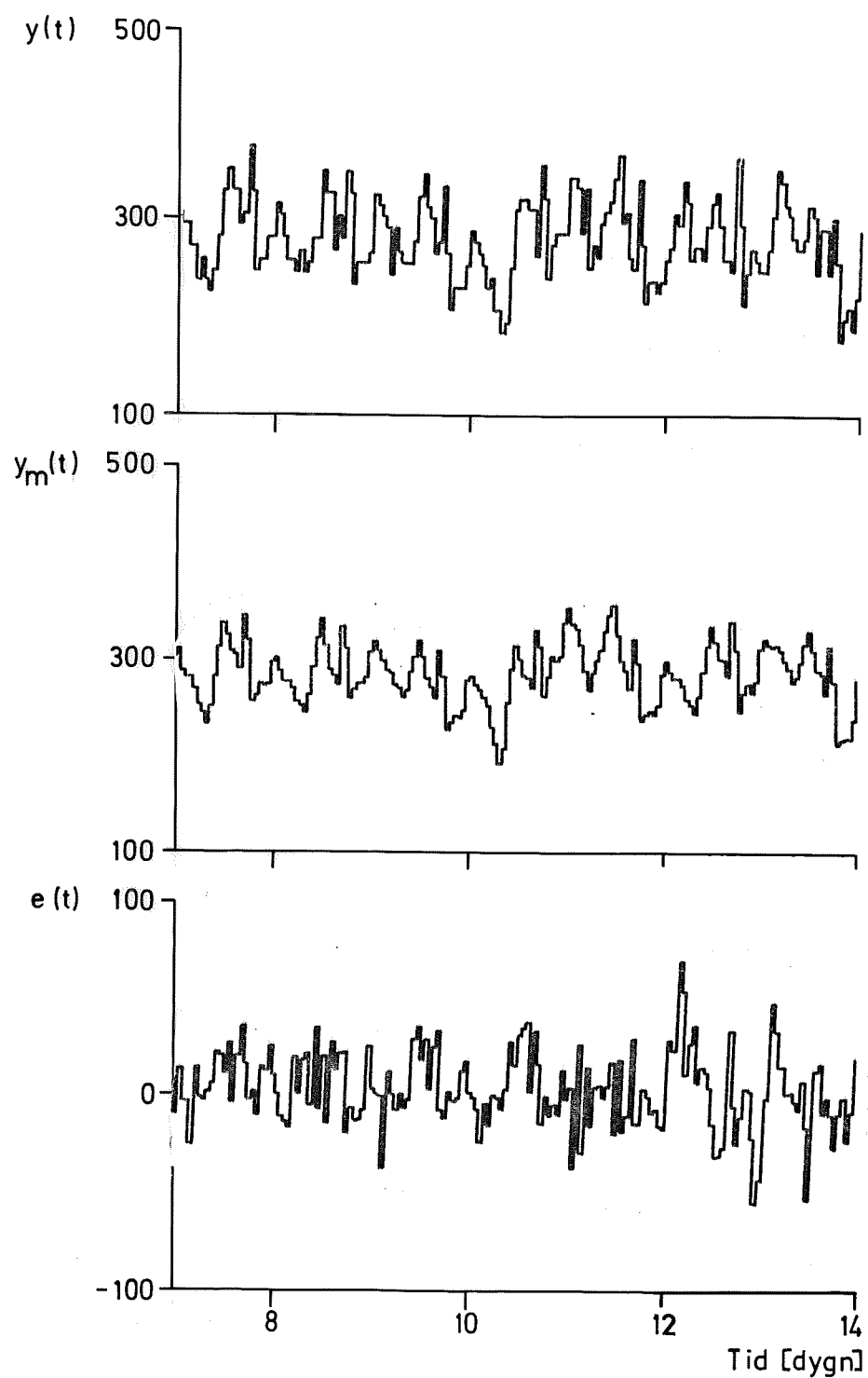


FIG 5.18 - Uppmätt fjärrvärmeeffekt  $y(t)$  i kW, modellens  $y_m(t)$  i kW och felet  $e(t) = y(t) - y_m(t)$  i kW för en modell med 25 parametrar. Det första predikterade dygnet är en måndag och dygnet börjar kl. 07.00.

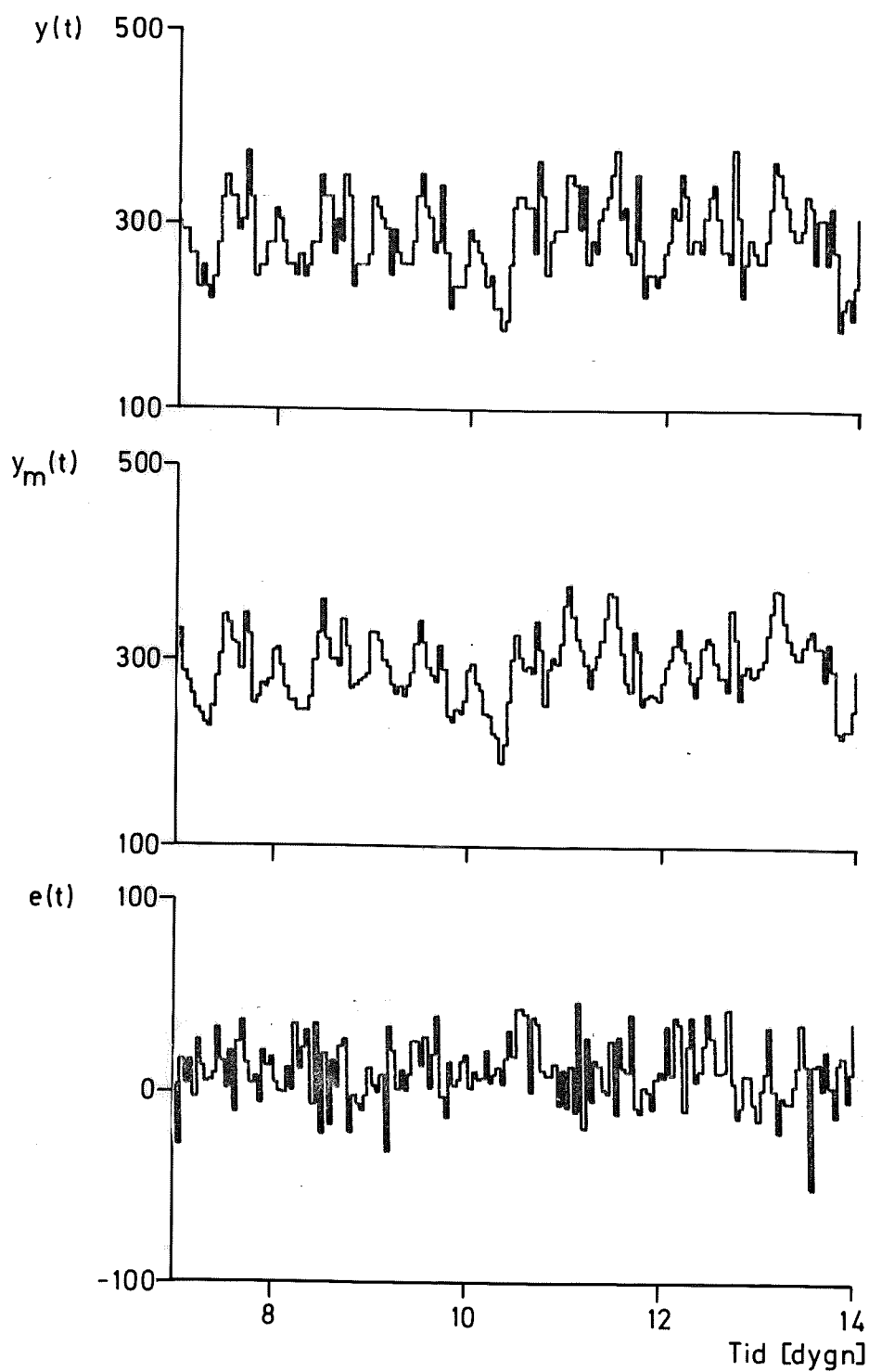


FIG 5.19 - Uppmätt fjärrvärmeeffekt  $y(t)$  i kW, modellens  $y_m(t)$  i kW och felet  $e(t) = y(t) - y_m(t)$  i kW för en modell med 169 parametrar. Det första predikterade dygnet är en måndag och dygnet börjar kl. 07.00.

Modellfelets storlek bör ses i relation till ett normalt tappvarmvattenuttag t.ex. en badkarstappning. Medeleffekten under en timme blir ungefär 6 kW. Detta kan jämföras med standardavvikelsen vid predition för felet i FIG 5.17 - 5.19.

Tabell 5.8 - Resultat modellanpassning.

n	antal modellparametrar			
a	modellparametrar			
$p_{med}$	periodicitetens medelvärde			
$rms_i$	rotmedelkvadrat för modellfelet vid identifiering			
$rms_p$	rotmedelkvadrat för modellfelet vid predition			
n	a kW/°C	$p_{med}$ kW	$rms_i$ kW	$rms_p$ kW
2	-8.4	310	32.7	41.7
25	-9.5	321	26.2	34.0
169	-8.7	312	20.6	35.0

Beloppet för parametern a som beskriver utetemperaturens inverkan varierar mellan 8 och 10 kW/°C. Detta skall jämföras med det beräknade statistiska värdet på 19 kW/°C. En möjlig förklaring är att husens tröghet inverkar varvid det momentana utetemperaturberoendet minskar. Samtidigt måste medelvärdet för periodiciteten öka, vilket också kan observeras för olika anpassningar.

En annan observation är att om utetemperaturen är periodisk så erhålls ett underbestämt ekvationssystem. En parameter kan väljas godtyckligt. Nu är utetemperaturen aldrig helt periodisk, men detta kan trots allt ge upphov till ett dåligt konditionerat ekvationssystem.

Avslutningsvis kan sägas att den här framtagna modellen kan användas för prediktion av fjärrvärmeeffektuttaget för ett bostadsområde under förutsättning att utetemperaturen kan predikteras. Felet i predikterad fjärrvärmeeffekt beroende på felaktigt predikterad utetemperatur kan uppskattas genom att multiplicera konstanten för utetemperaturens inverkan a med predictionsfelet i utetemperatur.

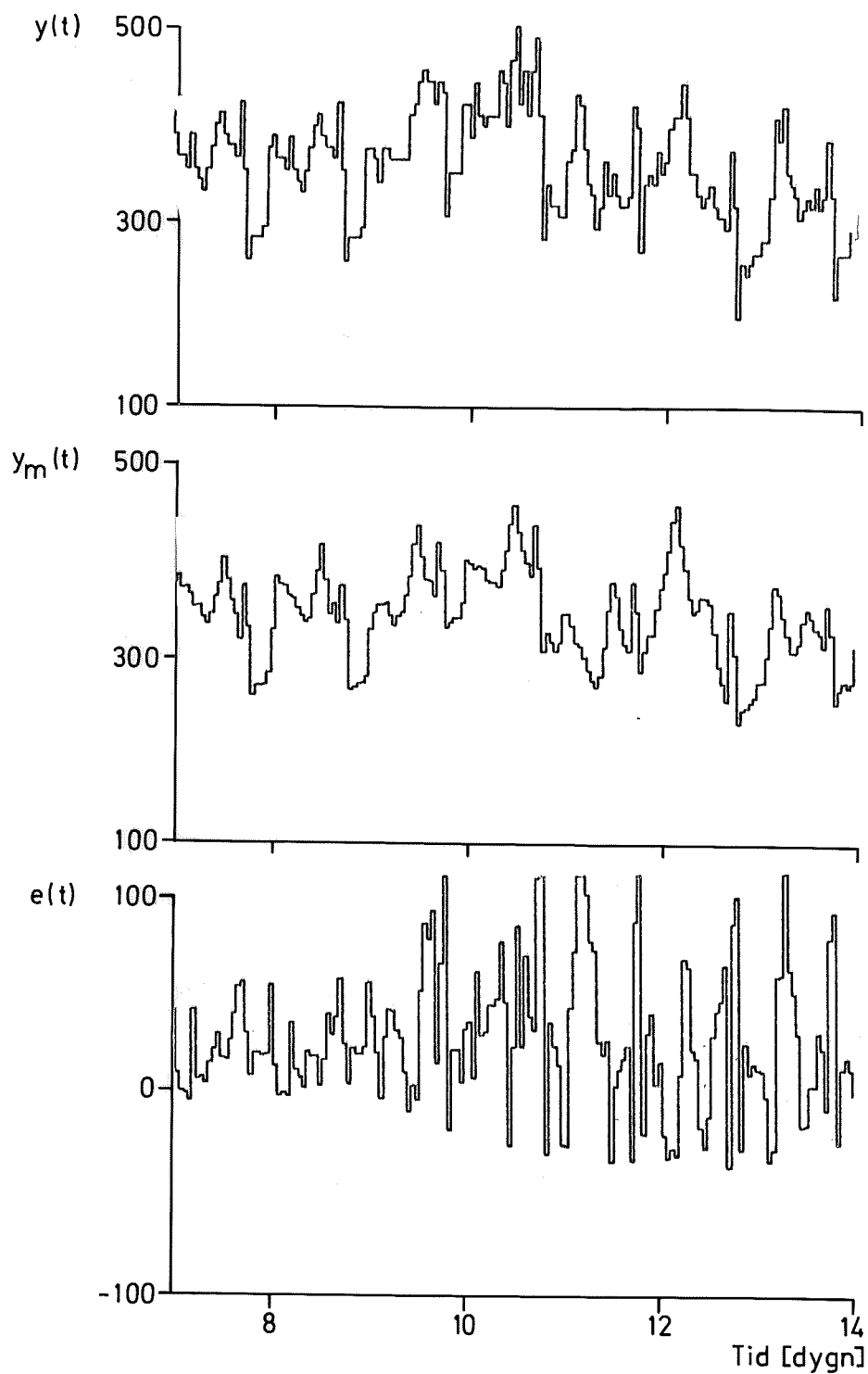


FIG 5.20 - Uppmätt fjärrvärmeeffekt  $y(t)$  i kW, modellens  $y_m(t)$  i kW och felet  $e(t) = y(t) - y_m(t)$  i kW för en modell med 169 parametrar. Det första predikterade dygnet är en måndag och dygnet börjar kl. 07.00. Modellen har använts för att prediktera veckan med julhelgen 1971.

Det är uppenbart att modellen ej kan användas vid speciella helger, som bryter den normala veckorytmen. Detta kan exemplifieras med prediktion av en vecka i vilken julhelgen 1971 inföll (FIG 5.20).

## 6. REFERENSER

Byggnadsenergigruppen, 1974: Energianvändning i byggnader. Byggforskningen R10:1974.

Ekström, L., Hänsel, R., Jensen, L.H., Ljung, L., 1974a: Different Dynamic Models in an Air Conditioned Building. DBSAC, LIT, WR 1974:1.

Jensen, L.H., 1971: Mätningar på luftkonditioneringsanläggning med återblandning. Identifiering av delsystem. IR LTH, Rapport RE-92.

Jensen, L.H., 1973a: Dynamiska modeller för ett rum, del 2. IBR, LTH, AR 1973:7.

Jensen, L.H., 1973b: Dynamiska konstruktionsdatamodeller och maximum likelihood-modeller för en luftkanal. IBR, LTH, AR 1973:8.

Jensen, L.H., 1973c: Veckoprognoser av fjärrvärmeeffekt. IBR, LTH, AR 1973:9.

Jensen, L.H., Hänsel, R., 1974a: Computer Control of an Enthalpy Exchanger. DBSAC, LIT, WR 1974:8.

Jensen, L.H., Hänsel, R., 1974b: Computer Control of Room Air Temperature by Onoff Control of a Postheater. DBSAC, LIT, WR 1974:11.

Jensen, L.H., 1974c: Onoff Control of Room Air Temperature - Effect of Sensor Time Constant, Onoff Difference and Location. DBSAC, LIT, WR 1974:12.

Jensen, L.H., 1974d: Dynamic Models for Inlet Air to Room Air or Outlet Air Temperature. DBSAC, LIT, WR 1974:14.

Lundström, A., Nilsson, C., 1971: Undersökning av plattvärmväxlares dynamik. Mätning och identifiering. IR, LTH, Rapport RE-90.





## KAPITEL 6

### DIMENSIONERING AV REGULATORER

#### 1. INLEDNING

Detta kapitel behandlar dimensionering av regulatorer för klimatprocesser. Karakteristiska egenskaper hos klimatprocesser har behandlats tidigare i kapitel 5. Några av dessa är:

- ofta monotont stegsvar,
- driftsberoende statiska och dynamiska egenskaper.

De krav som ställs på regulatorer för klimatprocesser kan sammanfattas till

- billiga,
- enkla att injustera,
- enkla att handha,
- obetydlig tillsyn,
- driftsäkra,
- små styrsignaländringar.

Under avhandlingsarbetets gång undersöktes många olika regulatorprinciper såväl praktiskt som teoretiskt. Några av dessa är:

- till-från regulatorer,
- PID-regulatorer,
- linjärvadratiske regulatorer,
- självinställande regulatorer,
- kvotregulatorn.

En kort sammanfattning av de olika regulatorernas egenskaper ges nedan.

Ren till-från reglering är lämplig för klimatprocesser, som har en dynamik som kan approximeras med en liten tidsfördröjning och en stor tidskonstant. Till-från regleringen kan modifieras så att även stora tidsfördröjningar kan tas om hand.

PI-regulatorn torde räcka till i de flesta reglerfall. För svårare reglerproblem med varierande förstärkning torde kvotregulatorn eller enkla självinställande regulatorer klara av regleruppgiften.

Reglernoggrannheten kan förbättras genom att använda en linjärvadratisk regulator, men detta sker på bekostnad av större regulatorutsignaler (mer slitage).

Under arbetets gång fann jag en ny regulatortyp, kvotregulatorn, som visade sig passa mycket bra för många av regleruppgifterna. Speciellt visade det sig att kvotregulatorn i många fall kunde klara av förstärkningsvariationerna.

## 2. KONVENTIONELLA REGULATORER

I detta avsnitt ges en kort sammanfattning av de konventionella regulatorernas egenskaper. Avsikten är att ge underlag som gör det möjligt att bedöma när konventionella regulatorer kan användas och att exemplifiera situationer när de konventionella regulatorerna ej är tillräckliga.

### Till-från reglering

Till-från regulatorer eller tvålägesregulatorer är enkla och billiga. För många klimatprocesser ger de också tillräcklig reglernoggrannhet.

Det finns inte någon generell teori för tvålägesreglering. Vissa speciella system har dock räknats igenom. Se t ex böckerna av Roots (1969) och Oppelt (1964). I Roots bok analyseras ett fall då processen beskrivs av överföringsfunktionen

$$G(s) = K \frac{\exp(-T_d s)}{1 + sT}. \quad (6.1)$$

Med en tvålägesregulator erhålls en självsvängning med topp-till-topp värde

$$\hat{y} = K [1 - \exp(-T_d/T)]. \quad (6.2)$$

Svängningens amplitud är således liten om  $T_d/T$  är liten men den kan bli avsevärd om  $T_d$  är av samma storlek som  $T$ .

En tvålägesregulator ger i allmänhet en reglering där utsignalen har ett medelvärdesfel. Detta beror på att styrsignalen mättas. Effekten har analyserats i Jensen (1976). I FIG 6.1 visas medelfelet vid tvålägesreglering av processen (6.1).

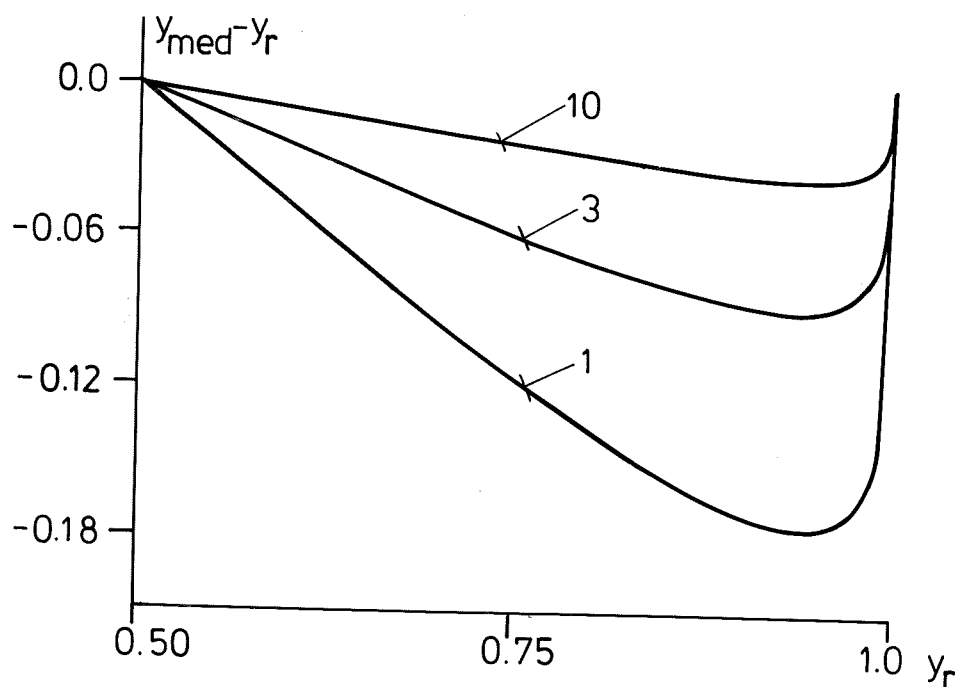


FIG 6.1 - Medelfelet vid till-från reglering som funktion av börvärdet  $y_r$  och för några olika tidskonstanter  $T=1, 3$  och  $10$  tidsenheter,  $T_d=1$  tidsenhet och  $K=1$  för processen (6.1).

Till-från regleringens egenskaper kan förbättras genom att införa derivation. Styrlagen blir då

$$u = \text{sign} \left[ y_r - y - b \frac{dy}{dt} \right].$$

Detta komplicerar dock regulatorn något. Lämpligt val av  $b$  har diskuterats i Jensen (1976). Parametern  $b$  varierar med börvärdet  $y_r$ .

### Pulslängdsmodulerad till-från reglering

Om processen innehåller en tidsfördröjning, som är större än den dominerande tidskonstanten, kommer ren till-från reglering ej att vara tillfredsställande. Med en modell av processen kan däremot till-från regleringen förbättras. Modellen används för att prediktera utsignalen och insignalen väljs därefter så att felet blir så litet som möjligt.

Ett annat sätt att förbättra till-från reglering är att pulslängdsmodulera insignalen. Detta är ett sätt att implementera en till-från signal så att den verkar vara kontinuerlig. Insignalens tilltid är proportionell mot den önskade kontinuerliga insignalen och den totala periodlängden.

Den pulslängdsmodulerade insignalen  $u_p(t)$  fås genom följande konvertering av den kontinuerliga insignalen  $u(t) = u_0$ , som kan anta värden i intervallet  $(0,1)$ .

$$u_p(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < u_0 t_p \\ 0 & u_0 t_p \leq t < t_p \end{cases}$$

Hur mycket den pulslängdsmodulerade utsignalen från processen avviker från den rätta i tidpunkterna  $t = n \cdot t_p$  och för  $T_d = m \cdot t_p$  ( $n$  och  $m$  är heltal) kan beräknas till

$$f = K(u_0 + u_0 e^{-1/T} - e^{-(1-u_0)/T} + e^{-1/T}) / (1 - e^{-1/T}).$$

Uttrycket kan approximeras för stora tidskonstanter  $T$ . Felet blir approximativt

$$f \approx -Ku_0(1-u_0)/2T.$$

Att felet alltid är negativt beror på att pulslängdsmoduleringen börjar med till och avslutas med från. Av det approximativa uttrycket för felet framgår att felet är mindre än 1 % om tidskonstanten  $T$  är större än 12.5 tidsenheter.

Det är uppenbart att för till-från reglerade klimatprocesser, som inte innehåller några mekaniskt rörliga delar, kan den maximala pulslängden göras hur liten som helst. Detta är t ex fallen vid tyristorreglering av elvärmare. Exempel på motsatsen där det inte går att göra är t ex vid processer med magnetventiler eller processer, där reläer ingår. Puls-längden blir i dessa senare fall en kompromiss mellan livslängd och reglernoggrannhet.

### Dimensionering av PID-regulatorer

En del klimatprocesser har ofta en dynamik som är försumbar i förhållande till de störningar som de utsätts för och i förhållande till den efter-följande dynamiken. Processen kan därför behandlas som om den var statisk.

En lämplig regulator är en samplad I-regulator vars förstärkning är lika med den inverterade processförstärkningen. Om processförstärkningen varierar, måste den absolut största processförstärkningen användas vid beräkning av I-regulatorns förstärkning. Vid låga processförstärkningar blir regleringen långsam.

En process behöver i och för sig ej vara statisk för att en I-regulator skall kunna användas för reglering. Den processdynamik som observeras beror på samplingsintervallet. Genom att öka samplingsintervallet kan en process uppfattas som en rent statisk process.

En regulators uppgift är att slå ner störningar. Hur snabbt störningar skall slås ner kan kvantifieras med att ange det slutna systemets poler eller den karakteristiska ekvationens nollställten. Antag att processekvationen är av första ordningen

$$y(t+1) = a y(t) + b u(t)$$

och att regulatorn är en PI-regulator

$$u(t) = u(t-1) + c[y(t) - y(t-1)] + d y(t).$$

Då erhålls en dubbelpol i  $e$  med följande regulatorparametrar:

$$c = (e^2 - a) / b$$

$$d = -(1 - e)^2 / b.$$

Ziegler Nichols inställningsregler för kontinuerliga PID-regulatorer finns överförda till samplade PID-regulatorer av Takahashi m fl (1971). Dessa inställningsregler skiljer sig något från de kontinuerliga, men när samplingsintervallet går mot noll blir reglerna identiska.

Nackdelen med dessa regler är att speciella experiment måste utföras. I ett fall krävs det att processen självsvänger, vilket kan vara svårt att göra, och i ett annat fall används ett stegsvar för att bestämma regulatorparametrarna.

Simulering är en ytterst rättfram metod. Den är ej heller speciellt tidskrävande om endast en, två eller tre regulatorparametrar skall bestämmas. Metoden kräver en modell för den process för vilket en regulator skall bestämmas.

Vid dimensionering av PID-regulatorer kan man få ett bra startvärde genom att använda sig av någon av Ziegler Nichols två metoder. Med dessa framräknade regulatorer kan modifieringar lätt provas genom simulering så att de uppfyller de uppställda kraven. Utvärderingen sker genom att störa det slutna systemet med ett steg eller en puls. Ett krav är att insignalen ej får överstiga sina begränsningar för små steg- eller pulsstörningar. Störningen bör ej heller ge upphov till oscillationer. En regulator inställd enligt Ziegler Nichols metod är ofta något oscillativ.

### Syntes av regulatorer med linjärvadratisk teori

De hitintills behandlade regulatorstrukturerna innehåller ett fåtal regulatorparametrar som skall bestämmas. En något mer komplicerad regulatorstruktur kan tänkas innehålla återkoppling från gamla in- och utsignaler. Problemet blir nu att bestämma alla dessa parametrar. Om en modell finns tillgänglig för processen kan den användas för att tillsammans med linjärvadratisk reglerteori ta fram lämpliga regulatorparametrar. Detta

är möjligt att göra efter ett lämpligt val av tillståndsvariabler som motsvarar de i modellen ingående gamla in- och utsignalerna. Till dessa tillstånd adderas även utsignalens integral för att regulatorn skall kunna reglera bort felet helt.

Fördelen med linjärvadratisk reglerteori är att användaren ges en möjlighet att göra en avvägning mellan reglerfel och styrsignaler. Detta är inte fallet för dead-beat och minimalvariansregulatorer, som i regel ger upphov till mycket stora styrsignaler. Med pulsöverföringsfunktionen

$$H(q^{-1}) = \frac{(b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots + b_n q^{-n})}{(1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_n q^{-n})} q^{-k} \quad (6.3)$$

blir ett enkelt val av tillståndsvektor

$$x(t) = [\tilde{y}(t), y(t), y(t-1), \dots, y(t-n), u(t-1), \dots, u(t-n-k)]^T \quad (6.4)$$

$$\tilde{y}(t) = \tilde{y}(t-1) + y(t-1).$$

De element i systemmatriserna A och B, som är skilda från noll, erhålls enkelt från pulsöverföringsfunktionen.

Oftast är det ej av intresse att straffa alla tillstånden i modellen utan endast vissa. Då kravet på regulatorn är att göra utsignalen och dess integral till noll med en insignal som ej kommer att ligga alltför ofta på begränsningen, användes förlustfunktionen

$$V = \sum_{t=0}^{\infty} q_1 y^2(t) + q_2 \tilde{y}^2(t) + q_3 u^2(t) \quad (6.5)$$

där  $y(t)$  är utsignalen,  $\tilde{y}(t)$  är dess integral och  $u(t)$  är som tidigare insignalen. Det är ingen begränsning att sätta  $q_3 = 1$ .

Tillämpning av linjärvadratisk reglerteori kräver mycket programmering och det är därför av intresse att ha tillgång till färdiga programpaket. Dessa programpaket bör vara interaktiva, annars kan arbetet med att ta fram en lämplig regulator ta mycket lång tid om arbetet skall utföras i form av batch-körningar. Författaren har använt programpaketet SYNPAK implementerat på en PDP-15.

### 3. ENKLA SJÄLVINSTÄLLANDE REGULATORER

Inom klimatprocesser finns det ett flertal olinjära delprocesser vars dynamik kan försummas vid ett samplingsintervall av en minut. Exempel på sådana delprocesser är

- entalpiväxlare,
- vattenblandning (ventiler),
- luftblandning (spjäll).

Då den totala klimatprocessens dynamik ligger i tidsområdet några minuter, är det knappast av intresse att reglera med ett samplingsintervall mindre än en minut. Ett mindre samplingsintervall skulle knappast leda till bättre reglering utan snarare till ökat slitage genom möjlighet till fler insignaländringar per tidsenhet.

Oftast är en del av de störningar, som påverkar dessa processer, långsamma, vilket ej heller berättigar att använda ett kort samplingsintervall. Problemet med dessa nästan statiska processer är att de kan vara starkt olinjära. Processförstärkningen kan variera en faktor 10-100. Så stora förstärkningsvariationer medför att en regulator med fixa parametrar får dimensioneras för högsta processförstärkningen. En I-regulator kommer då att vara mycket långsam vid låga processförstärkningar.

Enda kravet på olinjäriteten kommer i fortsättningen att vara att den är en kontinuerlig inverterbar funktion. Detta innebär att varje insignal motsvaras av en utsignal och tvärtom. Vidare behöver olinjäriteten ej vara konstant i tiden utan långsamma variationer kan tillåtas. Den snabba dynamiken kan försummas med ett samplingsintervall på en minut, men problemet med olinjäriteten kvarstår.

Ett alternativ till en regulator med fixa parametrar är då att identifiera processförstärkningen i den aktuella arbetspunkten. Detta innebär att olinjäriteten approximeras med en rät linje i den aktuella arbetspunkten dvs. att olinjäriteten linjäriseras. Två parametrar måste bestämmas. Den självinställande regulatorn med två parametrar kan betraktas som en PI-regulator, där förstärkningen och hela integraldelen bestäms.



Regulatorn kan förenklas till en regulator med bara en parameter av P-typ eller I-typ. P-regulatorn kan vara lämplig när olinjäriteten endast är svagt olinjär och när totala kretsförstärkningen varierar långsamt med tiden.

### En självinställande regulator med två parametrar

Den statiska processen antas kunna beskrivas med en inverterbar funktion  $f(x)$ , som har följande egenskaper

$$\begin{aligned} f(x) &= 0 & \text{för } x &= 0 \\ f(x) &> 0 & \text{för } x &> 0 \end{aligned} \quad (6.6)$$

Den statiska processen kan nu skrivas som

$$y(t+1) = f(u(t)). \quad (6.7)$$

Börvärdet  $y_r$  antas alltid vara positivt.

Den självinställande regulatorn använder sig av en enkel linjär modell av processen på formen

$$y(t+1) = a u(t) + b. \quad (6.8)$$

Genom att anpassa modellen (6.8) till gamla in- och utsignalpar, så kan modellparametrarna  $a$  och  $b$  skattas. Med dessa skattade parametrar  $\hat{a}$  och  $\hat{b}$ , kan modellekvationen användas för att beräkna en ny insignal så att utsignalen  $y(t+1)$  enligt ekvation (6.8) skulle blivit  $y_r$ :

$$u(t) = (y_r - \hat{b}) / \hat{a}. \quad (6.9)$$

Estimeringen av parametrarna  $a$  och  $b$  sker genom att minimera en förlustfunktion  $V(a,b)$ . Förlustfunktionen anger summan av kvadraten på det vinkelräta avståndet till linjen  $(a,b)$  från de erhållna mätningarna av insignalen  $u(t)$  och utsignalen  $y(t+1)$ . Kvadraten på det vinkelräta avståndet från den räta linjen  $(a,b)$  till punkten  $(y(t), u(t-1))$  kan skrivas som

$$d^2(a,b,y(t),u(t-1)) = \frac{(y(t)-au(t-1)-b)^2}{(a^2+1)}.$$

Förlustfunktionen kan nu skrivas som

$$V(a,b) = \sum_{i=1}^t \frac{(y(i)-au(i-1)-b)^2}{(a^2+1)}$$

eller

$$V(a,b) = \frac{1}{(a^2+1)} \sum_{i=1}^t \left[ y^2(i) + a^2 u^2(i-1) + b^2 - 2ay(i)u(i-1) - 2by(i) + 2abu(i-1) \right].$$

För att förenkla skrivsättet ersätts alla de fem summorna av in- och utsignaler med beteckningarna  $Sy^2$ ,  $Su^2$ ,  $Syu$ ,  $Sy$  och  $Su$ . Förlustfunktionen kan nu skrivas som

$$V(a,b) = \frac{N}{(a^2+1)} (Sy^2 + a^2 Su^2 + b^2 - 2aSyu - 2bSy + 2abSu). \quad (6.10)$$

Minimering m a p  $a$  och  $b$  ger

$$\hat{a} = -p + \sqrt{p^2+1} \quad (6.11)$$

$$\hat{b} = Sy - \hat{a} Su \quad (6.12)$$

där

$$p = (Su^2 - (Su)^2 + (Sy)^2 - Sy^2) / 2(Syu - SySu) \quad (6.13)$$

Regulatorn kan sammanfattas med

1. beräkna  $Su^2, S_{yu}, S_y^2, S_u$  och  $S_y$
2. "  $p$  enligt (6.13)
3. "  $\hat{a}$  " (6.11)
4. "  $\hat{b}$  " (6.12)

Detta problem kan också lösas med den normala minsta kvadratmetoden, i vilken det lodräta avståndet minimeras. Lösningen fås som

$$\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Su^2 & Su \\ Su & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} S_{yu} \\ S_y \end{pmatrix}.$$

### En självinställande P-regulator

Denna regulator erhålls som ett specialfall av föregående, då parametern  $b = 0$ . I detta fall antas alltså att processen kan linjäriseras till uttrycket

$$y(t+1) = au(t).$$

Regulatorn fås som

$$u(t) = y_r / \hat{a}.$$

Parametern  $\hat{a}$  bestäms som tidigare

$$\hat{a} = -p + \sqrt{p^2 + 1},$$

där i stället

$$p = \frac{Su^2 - S_y^2}{2S_{yu}}.$$

Den normala minsta kvadratmetoden ger lösningen:

$$\hat{a} = \frac{S_{yu}}{Su^2}.$$

Denna regulator är lämplig att använda vid svaga olinjäriteter där i stället den totala kretsförstärkningen varierar mycket men långsamt i tiden. Om processen är starkt olinjär måste parametern  $a$  ändras betydligt vid en ändring av arbetspunkt.

### En självinställande I-regulator

Denna regulator kan ersätta den tidigare regulatorn med två parametrar. Samma egenskaper kan erhållas genom att linjärisera processen kring aktuellt börvärde och insignalnivå. Endast en parameter  $a$  bestäms. Den anger den lokala processförstärkningen. Följande processmodell används

$$y(t+1) - y(t) = a(u(t) - u(t-1)).$$

Regulatorn som ger  $y(t+1) = y_r$  om  $a = \hat{a}$

$$u(t) = u(t-1) - (y(t) - y_r)/\hat{a}.$$

Parametern  $a$  skattas som

$$\hat{a} = -p + \sqrt{p^2 + 1}$$

där

$$p = \frac{S\Delta u^2 - S\Delta y^2}{2S\Delta y\Delta u}.$$

Minsta kvadratmetodens skattning blir

$$\hat{a} = \frac{S\Delta y\Delta u}{S\Delta u^2}.$$

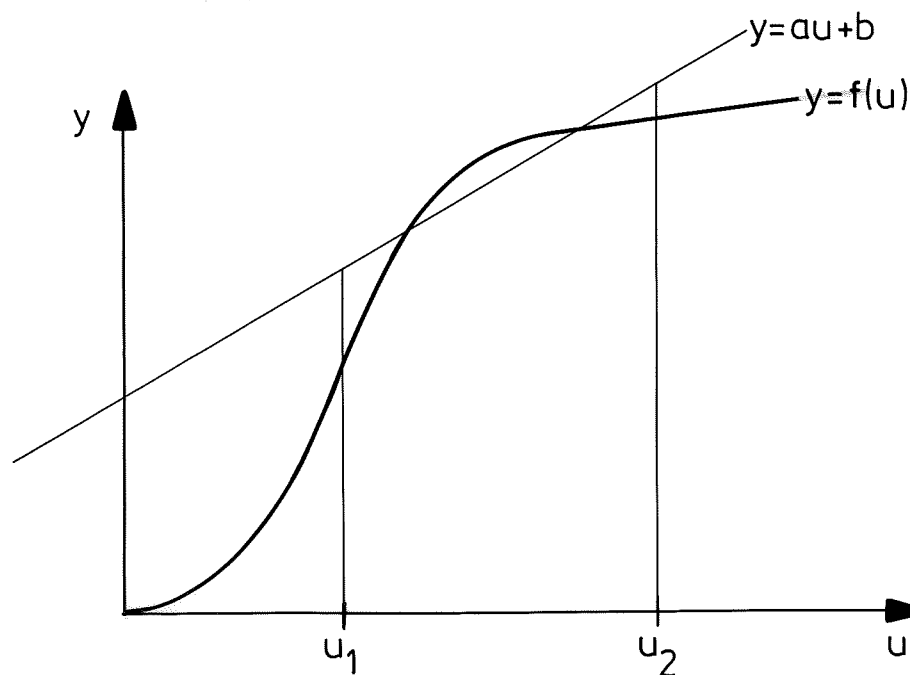


FIG 6.2 - Exempel på olinjäritet och en anpassning av en rät linje i arbetsområdet  $(u_1, u_2)$ .

#### 4. KVOTREGULATORN

##### Regulatoridé

Det finns många klimatprocesser, där kraven på reglernoggrannhet är måttliga. Kraven kan i dessa fall anges som att medelfelet skall vara litet. Kortvariga större fel kan tolereras i synnerhet om den efterföljande dynamiken är starkt dämpande. I sådana fall kan det vara möjligt att använda en enkel regulator.

Det är tänkbart att använda P-, I- eller PI-regulatorer. En nackdel med dessa är att regulatorparametrar måste bestämmas. En självinställande regulator är ett annat alternativ. En sådan regulator kräver i regel att några hjälpparametrar anges. Dessutom kräver den mer räkningar och mer minnesutrymme än en PI-regulator. I detta avsnitt beskrivs en enkel parameterfri regulator, som kan reglera medelfelet till noll. Regulatorn beskrivs av ekvationen

$$u(t) = u(t-1) y_r / y(t) \quad (6.14)$$

Denna regulator benämns i fortsättningen kvotregulatorn.

Kvotregulatorn har inget stationärt fel. Detta framgår av regulator-ekvationen (6.15), ty det följer att  $u(t+1) - u(t)$  är negativ om  $y(t) > y_r$  och omvänt.

Ekvation (6.14) kan skrivas som

$$u(t) = u(t-1) - \frac{u(t-1)}{y(t)} [y(t) - y_r] \quad (6.15)$$

Kvotregulatorn kan tolkas som en I-regulator med varierande förstärkning. Förstärkningen är proportionell mot  $u(t-1)/y(t)$ .

Idén med regulatorn är att uppskatta den statiska förstärkningen för en process med kvoten  $y(t)/u(t-1)$  och att göra en integrerande regulator vars förstärkning är omvänt proportionell mot processförstärkningen.

Med den uppskattade statiska förstärkningen kan den önskade insignalen  $u(t)$  beräknas från önskade börvärdet  $y_r$ . Uppskattningen blir exakt för en linjär process som består av en ren tidsfördröjning. En sådan process kan beskrivas som

$$y(t) = a u(t-1)$$

Regulatorn blir nu

$$u(t) = \frac{u(t-1)y_r}{a u(t-1)} = y_r/a$$

och det slutna systemet kan således beskrivas av

$$y(t+1) = y_r(t).$$

Kvotregulatorns uppskattning av processförstärkningen kan även tolkas som en urartad identifiering med minsta kvadratmetoden.

Kvotregulatorn kan också tolkas som en iterativ metod att lösa ekvationen  $f(u) - y_r = 0$  med formeln  $u_{n+1} = u_n y_r / f(u_n)$ . Metoden motsvarar

Newton-Raphsons metod med variabel korda med kordans ena ändpunkt i origo och den andra i punkten  $(u_n, f(u_n))$ .

$$u_{n+1} = u_n - \frac{f(u_n) - y_r}{k}$$

$$k = \frac{(f(u_n) - 0)}{(u_n - 0)}$$

eller förenklat

$$u_{n+1} = \frac{y_r u_n}{f(u_n)}$$

Kvotregulatorns egenskaper skall nu undersökas närmare.

### Reglering av olinjära statiska processer

Vi skall först undersöka kvotregulatorns egenskaper vid reglering av processer som kan beskrivas av en tidsfördröjning och en statisk olinjäritet. Det antas alltså att processen kan beskrivas som

$$y(t+1) = f(u(t)) \tag{6.16}$$

Modellen (6.16) kan vara en god approximation för ett olinjärt stabilt system som samplats med så lång samplingsperiod att stationaritet uppnåtts redan efter ett samplingsintervall. Modellen är rimlig för många klimatprocesser där kraven på insvängningstid är måttliga. För korthets skull kallas en process som beskrivs av (6.16) en statisk process.

Vi skall nu undersöka vilka krav som skall ställas på den olinjära funktionen  $f$  för att kvotregulatorn skall ge ett slutet system med en stabil jämviktspunkt. För många klimatprocesser representeras styrvariabeln  $u$  av ett ventilläge. Det är ingen förlust i allmängiltighet att förutsätta att  $u$  är positiv. På samma sätt är det vanligt för VVS-processer att funktionen  $f$  är positiv och monotont växande. Detta garanterar att jämviktslösningen existerar och är entydig.

Vi har följande resultat

### Sats

Betrakta en statisk process (6.16) som regleras med kvotregulatorn (6.14). Låt jämviktslösningen vara  $y(t) = y_r$  och  $u(t) = u_r$ . Jämviktslösningen är lokalt stabil om processens olinjäritet  $f$  är sådan att

$$0 < u_r f'(u_r) < 2f(u_r) \text{ för alla } u_r > 0. \quad (6.17)$$

### Bevis

Det slutna systemet beskrivs av ekvationerna

$$y(t+1) = f(u(t))$$

$$u(t) = \frac{y_r}{y(t)} u(t-1).$$

Om  $u_r$  är en jämviktslösning gäller

$$y_r = f(u_r).$$

Elimination av  $y$  ger

$$u(t+1) = y_r \frac{u(t)}{f(u(t))} = F(u(t)).$$

Denna differensekvation är lokalt stabil om  $|F'(u_r)| < 1$  men

$$F'(u) = y_r \frac{1}{f(u)} - \frac{y_r u f'(u)}{f^2(u)}$$

$$= \frac{y_r}{f(u)} \left[ 1 - \frac{u f'(u)}{f(u)} \right].$$

Alltså gäller

$$F'(u_r) = 1 - \frac{u_r f'(u_r)}{f(u_r)}.$$



Villkoret (6.17) medför nu att  $|F'(u_r)| < 1$  och satsen är bevisad.

#### Anmärkning 1

Storheten  $f(u_0) / u_0$  kan tolkas som den globala förstärkningen i punkten  $u_0$  för processen (6.16) och storheten  $f'(u_0)$  kan tolkas som processens lokala förstärkning. Stabilitetskravet (6.17) kan således uttryckas så att processens lokala förstärkning skall vara positiv och mindre än dubbla värdet av den globala förstärkningen.

#### Exempel

Om kvotregulatorn reglerar en statisk process med  $f(u) = a u^p$ ,  $a > 0$  så blir jämviktslösningen lokalt stabil om  $0 < p < 2$ . I detta fall är jämviktslösningen också globalt stabil.

Det slutna systemet beskrivs av

$$y(t) = a u^p(t-1)$$

$$u(t) = y_r \frac{u(t-1)}{y(t)}$$

d v s

$$\frac{u(t)}{u_r} = \left( \frac{u(t-1)}{u_r} \right)^{1-p}$$

Denna differensekvation konvergerar då  $|1-p| < 1$  d v s  $0 < p < 2$ .

Om  $p < 1$  blir konvergensen monoton, om  $p > 1$  blir den alternerande. I FIG 6.3 återges hur  $y$  svänger in sig för tre olika  $p$ -värden.

Detta exempel kan nu generaliseras till allmännare funktioner  $f$ .

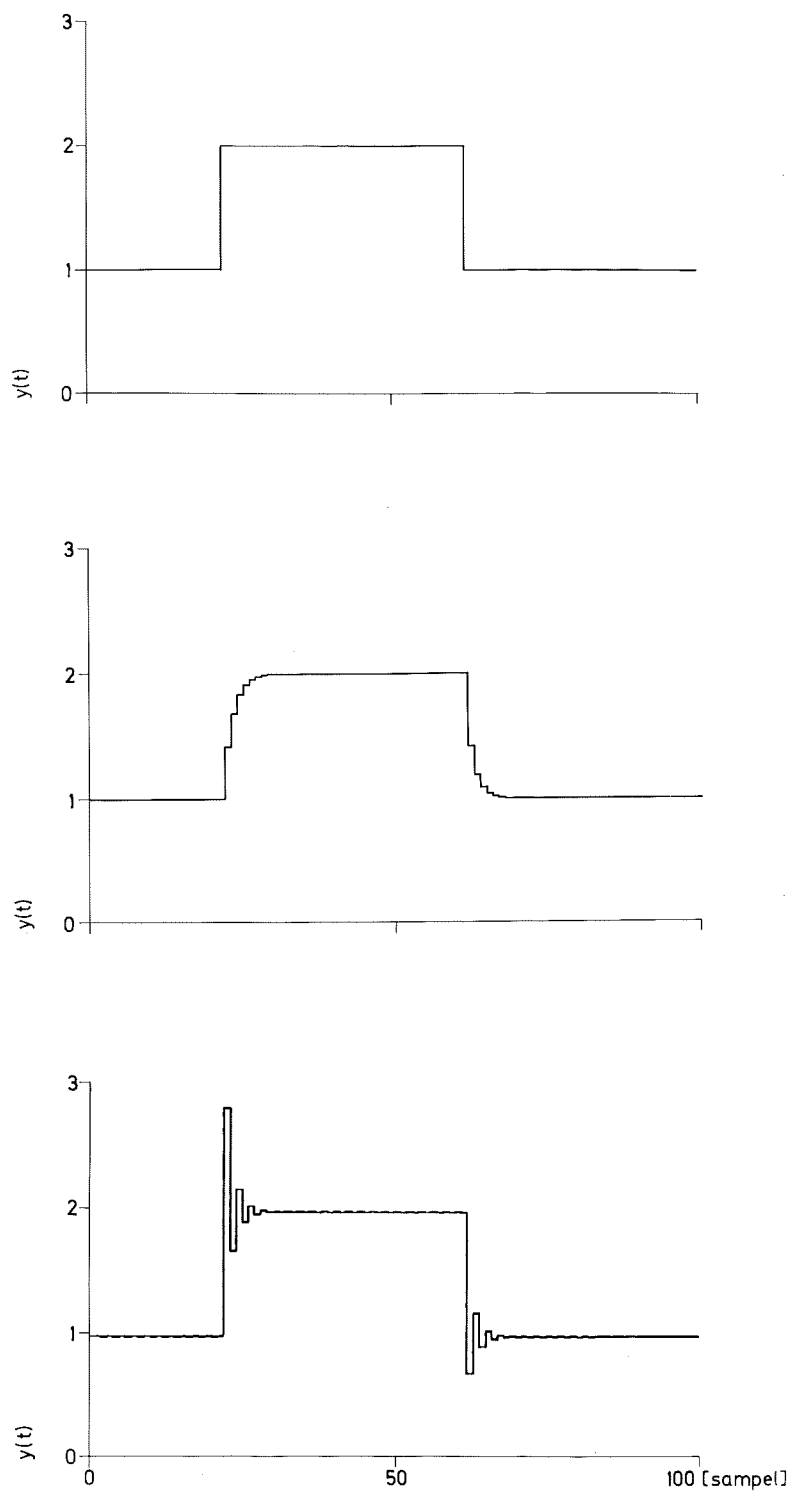


FIG 6.3 - Exempel på olika insvängningsförlopp för en ändring av referensvärdet från 1 till 2 från sampel 20 till 60 för kvotregulatorn för processerna  $f(u) = u$ ,  $f(u) = u^{0,5}$  och  $f(u) = u^{1,5}$  i nämnd ordning uppfifrån.

Sats 2

Betrakta ett system (6.16) där funktionen  $f$  uppfyller villkoren

$$0 < u f'(u) < 2f(u) \text{ för alla } u > 0.$$

Kvotregulatorn (6.14) ger ett slutet system där jämviktslösningen  $y(t) = y_r$  är globalt stabil för alla  $y_r$ .

Bevis

Det följer av (6.17) att funktionen  $f$  är monotont växande. Det följer också av differentialolikheten (6.17) att kurvan  $y = f(u)$  kan stängas in mellan en rät linje  $y(u) = y_r$  och parabeln  $y(u) = y_r(u/u_r)^2$ .

D v s

$$y_r(u/u_r)^2 < f(u) < y_r \text{ för } u < u_r$$

$$y_r < f(u) < y_r(u/u_r)^2 \text{ för } u > u_r.$$

Det slutna systemet beskrivs av

$$u(t+1) = u(t) \frac{f(u_r)}{f(u(t))}.$$

Inför

$$x_t = \max \left( \frac{u_r}{u(t)}, \frac{u(t)}{u_r} \right)$$

Det följer av ovanstående olikheter att

$$u(t) < u(t+1) < \frac{u_r^2}{u(t)} \text{ för } u(t) < u_r.$$

och

$$\frac{u_r^2}{u(t)} < u(t+1) < u(t) \quad \text{för } u(t) > u_r. \quad (6.18)$$

Detta innebär att

$$\frac{1}{x_t} < \frac{u(t+1)}{u_r} < x_t$$

d v s

$$x_{t+1} < x_t.$$

Det följer av definitionen att  $x_t \geq 1$ . Sviten  $\{x_t\}$  är monoton och begränsad och konvergerar således då  $t \rightarrow \infty$ . Om  $\lim_{t \rightarrow \infty} x_t = 1$  så konvergerar också  $u(t)$  mot  $u_r$ .

Antag att  $\lim x_t = \alpha > 1$ .

Då gäller antingen att  $u(t) = \alpha u_r$  eller  $u(t) = u_r/\alpha$ . I det första fallet gäller enligt (6.18) att  $u(t+1) < u(t)$ . Enda möjligheten är då  $u(t+1) = u_r/\alpha$ . Detta ger en motsägelse ty det följer också av (6.18) att

$$\frac{u_r}{\alpha} = u(t+1) > \frac{u_r^2}{u(t)} = \frac{u_r}{\alpha}.$$

En analog motsägelse erhålles för fallet  $u(t) = u_r/\alpha$ . Satsen är således bevisad.

#### Anmärkning 1

Observera att om kvotregulatorn används på processen  $y(t) = au(t-1)+b$ , så är det slutna systemet stabilt om  $a > 0$  och  $au(t-1) > -2b$ . Observera också att då är  $y(t) < 0$  för  $u(t) < -b/a$ . Negativa värden på  $b$  leder alltid till instabilitet för tillräckligt små  $u(t)$ .

Anmärkning 2

Om kvotregulatorn (6.14) ger ett slutet system där jämviktslösningen  $y(t) = y_r$  är globalt stabil för alla konstanta  $y_r$  för processfunktionerna  $f(u)$  och  $g(u)$  då gäller detta också för den sammansatta funktionen

$$r(u) = a f(u) + b g(u), \quad a > 0, \quad b > 0.$$

Stabilitetskravet medför att

$$0 < a u f'(u) + b u g'(u) < 2 a f(u) + 2 b g(u),$$

vilket är uppfyllt då

$$0 < a u f'(u) < 2 a f(u)$$

och

$$0 < b u g'(u) < 2 b g(u).$$

Anmärkning 3

Om kvotregulatorn konvergerar för  $f(u)$  och  $g(u)$  och om  $f(u) > g(u)$  behöver kvotregulatorn inte konvergera för processfunktionen

$$h(u) = f(u) - g(u).$$

Kravet  $f(u) > g(u)$  medför inte att  $f'(u) > g'(u)$  och därför kan  $h'(u)$  bli mindre än noll för vissa  $u$ , vilket inte får inträffa.

Anmärkning 4

Om kvotregulatorn konvergerar för  $f(u)$  och  $g(u)$  och om  $f(u) > g(u)$  och  $f'(u) > g'(u)$  gäller, behöver kvotregulatorn inte konvergera för  $h(u) = f(u) - g(u)$ . Ett enkelt motexempel är

$$f(u) = k u \quad k > 1$$

$$g(u) = \begin{cases} u & u \leq 1 \\ (u+1)/2 & u \geq 1 \end{cases}$$

$$h(u) = \begin{cases} (k-1)u & u \leq 1 \\ ku - (u+1)/2 & u \geq 1 \end{cases}$$

För  $u \leq 1$  krävs att

$$0 < \frac{(k-1)u}{(k-1)u} < 2$$

vilket är uppfyllt. För  $u \geq 1$  krävs att

$$0 < \frac{(k-1/2)u}{ku - (u+1)/2} < 2$$

$$0 < \frac{(k-1/2)u}{(k-1/2)u - 1/2} < 2.$$

Olikheten gäller ej om  $(k-1/2)u < 1$  för  $u > 1$  och  $k > 1$ , vilket kan inträffa.

#### Anmärkning 5

Antag att kvotregulatorn konvergerar för processfunktionerna  $f(u)$  och  $g(u)$ . Detta behöver ej vara fallet för  $f(g(u))$  eller  $g(f(u))$ . Bilda  $h(u) = g(f(u))$  och beräkna  $h'(u)$  och insättning i olikheten (6.17) ger

$$0 < \frac{g'(f(u)) f'(u)u}{g(f(u))} < 2.$$

Efter förlängning med  $f(u)$  fås

$$0 < \frac{g'(f(u)) f(u)}{g(f(u))} \frac{f'(u)u}{f(u)} < 2.$$

Om däremot

$$0 < g'(u)u < \sqrt{2}g(u)$$

och

$$0 < f'(u)u < \sqrt{2}f(u)$$

konvergerar kvotregulatorn för den sammansatta funktionen  $g(f(u))$ .

Detta resonemang kan utsträckas till att gälla fler än två funktioner.

#### Anmärkning 6

Antag att kvotregulatorn konvergerar för  $h(u) = g(f(u))$ . Detta medför inte att kvotregulatorn konvergerar för  $g(u)$  och  $f(u)$ . Konvergensvillkoret är

$$0 < \frac{g'(f(u)) f(u)}{g(f(u))} \frac{f'(u)u}{f(u)} < 2.$$

Detta innebär ej att funktionerna  $f(u)$  eller  $g(u)$  var för sig uppfyller konvergenskravet.

Om  $f(u)$  ej ger konvergens kan man välja  $g(u) = f^{-1}(u)$ . Det gäller då att

$$g'(f(u)) = f'^{-1}(f(u)) = f'(u)^{-1}$$

och olikheten (6.17) blir nu uppfylld, ty

$$0 < \frac{1}{f'(u)u} \frac{f'(u)u}{f(u)} < 2.$$

Om processfunktionen  $f(u)$  är känd eller approximativt känd kan denna kunskap utnyttjas genom att skriva kvotregulatorn som

$$u(t) = u(t-1) \frac{f^{-1}(y_r)}{f^{-1}(y(t))}.$$

Om  $f(u)$  är identisk med processfunktionen gäller

$$u(t) = f^{-1}(y_r) = u_r,$$

dvs kvotregulatorn konvergerar i ett steg.

Konvergenshastighet

För den linjära processen

$$y(t+1) = au(t) \quad a > 0$$

konvergerar kvotregulatorn i ett steg. Det gäller att

$$y_r = au_r$$

och

$$u(t+1) = u(t) \frac{au_r}{au(t)} = u_r.$$

I fallet ovan är den globala förstärkningen lika med den lokala. Ett naturligt steg är då att undersöka konvergenshastigheten för funktionen  $f(u(t))$ , som uppfyller

$$c < \frac{f'(u(t))}{f(u(t))/u(t)} < 2-c, \quad 0 < c < 1. \quad (6.19)$$

Olikheten (6.19) kan skrivas som

$$\frac{c}{u(t)} < \frac{f'(u)}{f(u)} < \frac{2-c}{u(t)} \quad (6.20)$$

och efter integration från  $u_r$  till  $u(t)$  fås

$$c \ln \left( \frac{u(t)}{u_r} \right) < \ln \left( \frac{f(u(t))}{f(u_r)} \right) < (2-c) \ln \left( \frac{u(t)}{u_r} \right).$$

Uttrycket ovan kan också skrivas som

$$\left( \frac{u(t)}{u_r} \right)^c < \frac{f(u(t))}{f(u_r)} < \left( \frac{u(t)}{u_r} \right)^{2-c} \quad (6.21)$$

för  $u(t) > u_r$ , och som

$$\left( \frac{u(t)}{u_r} \right)^c > \frac{f(u(t))}{f(u_r)} > \left( \frac{u(t)}{u_r} \right)^{2-c} \quad (6.22)$$

för  $u(t) < u_r$ .



Efter omskrivning av olikheterna (6.21) och (6.22) med reguletoreskvationen erhålls olikheterna

$$\left(\frac{u(t)}{u_r}\right)^c < \frac{u(t)}{u(t+1)} < \left(\frac{u(t)}{u_r}\right)^{2-c} \quad (6.23)$$

och

$$\left(\frac{u(t)}{u_r}\right)^{2-c} < \frac{u(t)}{u(t+1)} < \left(\frac{u(t)}{u_r}\right)^c. \quad (6.24)$$

Efter multiplikation med faktorn  $u_r/u(t)$  erhålls följande olikheter

$$\left(\frac{u_r}{u(t)}\right)^{1-c} < \frac{u_r}{u(t+1)} < \left(\frac{u(t)}{u_r}\right)^{1-c} \quad (6.25)$$

$$\left(\frac{u(t)}{u_r}\right)^{1-c} < \frac{u_r}{u(t+1)} < \left(\frac{u_r}{u(t)}\right)^{1-c}. \quad (6.26)$$

Inför den tidigare använda beteckningen

$$x(t) = \max \left( \frac{u_r}{u(t)}, \frac{u(t)}{u_r} \right).$$

Ekvation (6.25) ( $u(t) > u_r$ ) kan nu skrivas som

$$x(t)^{c-1} < \frac{u_r}{u(t+1)} < x(t)^{1-c}.$$

För ekvation (6.26) ( $u(t) < u_r$ ) fås

$$x(t)^{c-1} < \frac{u_r}{u(t+1)} < x(t)^{1-c},$$

dvs för alla  $u(t) > 0$  gäller

$$x(t)^{c-1} < \frac{u_r}{u(t+1)} < x(t)^{1-c}. \quad (6.27)$$

För  $u(t+1) < u_r$  gäller

$$x(t+1) < x(t)^{1-c}$$

och för  $u(t+1) > u_r$  gäller

$$x(t+1) < x(t)^{1-c},$$

dvs för alla  $u(t+1) > 0$  gäller

$$x(t+1) < x(t)^{1-c}. \quad (6.28)$$

Nära konvergenspunkten 1 gäller

$$x(t+1) - 1 < x(t)^{1-c} - 1 \approx (1-c)(x(t)-1),$$

dvs minst linjär konvergens med konvergensradien  $(1-c)$ .

Observera att (6.19) är ett ganska starkt krav. En enkel funktion  $f(u(t)) = au(t)+b$ ,  $a > 0$ ,  $b > 0$ , uppfyller inte detta villkor för små  $u(t)$ . Konvergensradien  $k$  kan för detta fall beräknas till

$$k = \frac{b}{au(t)+b} = \frac{b}{y(t+1)}.$$

För specialfallet med  $b = 0$  blir konvergensradien  $k = 0$ , vilket innebär konvergens i ett steg.

Konvergensförloppet kan också analyseras genom att bilda kvoten mellan den senaste och näst senaste avvikelser i insignal till processen.

$$\frac{(u(t) - u_r)}{(u(t-1) - u_r)} = \frac{b}{(au(t-1) + b)}.$$

Uttrycket ovan visar att konvergensen är monoton för  $b > 0$  och alternerande för  $b < 0$ .

Konstanten  $b$  kan också tolkas som en störning eller belastning på processen. I FIG 6.4 återges två exempel på olika konvergensförlopp för funktionerna  $y(t+1) = 1,9 u(t) - 0,9$  och  $y(t+1) = 0,1 u(t) + 0,9$ .

Även om villkoret för stabilitet inte är uppfyllt är det möjligt att byta den variabla kordans ena ändpunkt som hitintills varit lika med origo. Detta innebär att ett koordinatbyte utförs och villkoret för stabilitet kan nu bli uppfyllt med de nya koordinaterna. (Om både insignals- och utsignalsmaxvärden är kända som  $u_{\max}$  och  $y_{\max}$ , så är det möjligt att byta punkten  $(0,0)$  mot

$(0, y_{\max})$ ,  $(u_{\max}, 0)$  och  $(u_{\max}, y_{\max})$ .) Vad detta innebär inses för fyra olika funktioner i FIG 6.5, för vilka kvotregulatorn endast skulle konvergerat i ett fall. Med detta koordinatbyte framgår det att även vissa monotont avtagande funktioner kan klaras av.

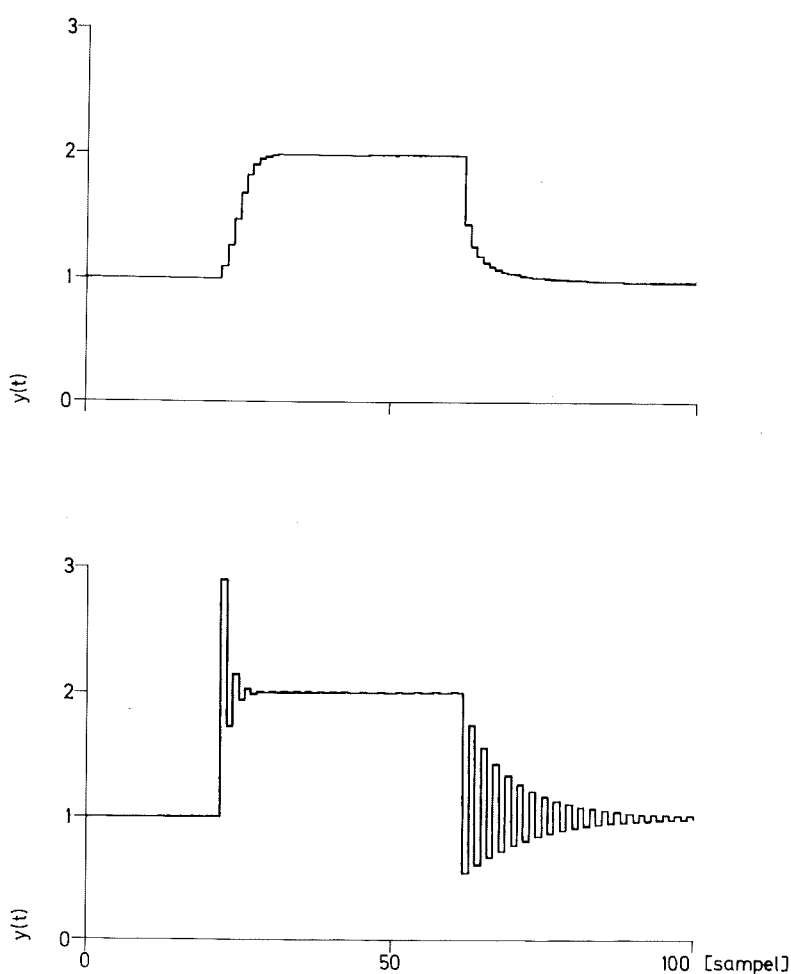


FIG 6.4 - Exempel på olika konvergensförlopp för en ändring av referensfrån 1 till 2 från sampel 20 till 60 för kvotregulatorn och för processerna  $y(t+1) = 0,1 u(t) + 0,9$  och  $y(t+1) = 1,9 u(t) - 0,9$ .

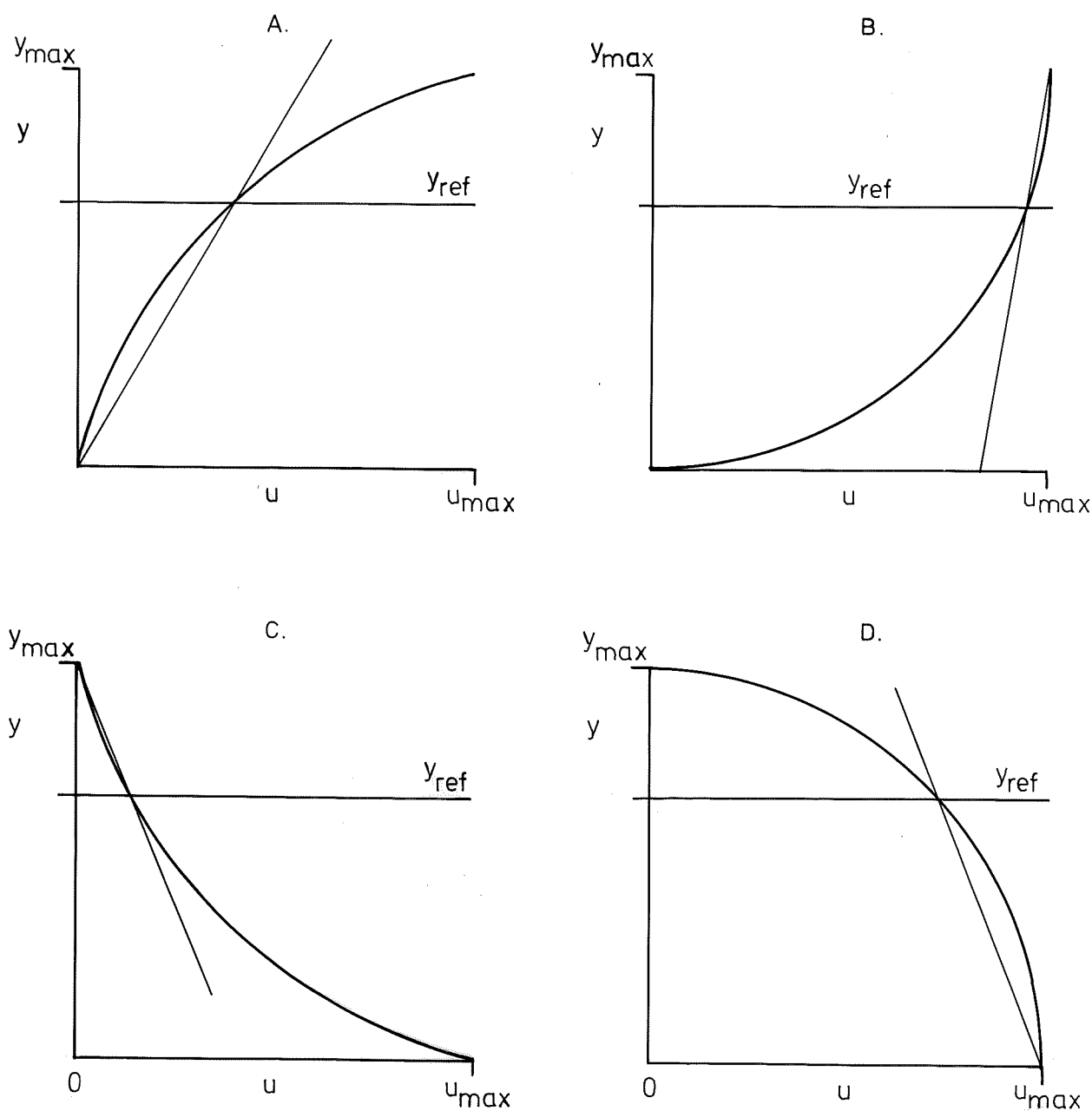


FIG 6.5 - Fyra olika typfall av kvotregulatorns tillämpning på olika statiska processer. Motsvarande kvotregulatorer är:

- A.  $u(t) = u(t-1) y_r / y(t)$
- B.  $u(t) = u_{max} - (u_{max} - u(t-1))(y_{max} - y_r) / (y_{max} - y(t))$
- C.  $u(t) = u(t-1)(y_{max} - y_r) / (y_{max} - y(t))$
- D.  $u(t) = u_{max} - (u_{max} - u(t-1)) y_r / y(t)$

### Kvotregulatorn med dämpning

Kvotregulatorn (6.14) försöker att styra processen så att referensvärdet uppnås på ett samplingsintervall. Man kan göra en modifikation av regulatorn så att korrektionen görs långsammare. En möjlighet är följande:

$$u(t+1) = u(t)[c + (1-c)y_r / y(t+1)] \quad 0 \leq c \leq 1. \quad (6.29)$$

Vi kallar denna regulator för kvotregulatorn med dämpning. Observera att regulatorn innehåller en parameter  $c$ . Denna parameter kallas dämpningsparametern. Värdet  $c = 0$  ger den vanliga kvotregulatorn.

Vi skall nu undersöka hur det slutna systemets egenskaper påverkas av valet av parametern  $c$ .

Konvergenskravet är som tidigare att

$$-1 < \frac{(u(t+1) - u_r)}{(u(t) - u_r)} < 1$$

$$-1 < \frac{(c u(t) + (1-c)u(t)y_r)/(a u(t) + b) - u_r}{(u(t) - u_r)} < 1.$$

Efter förenkling fås för processen (6.29) att

$$-1 < \frac{(c a u(t) + b)}{(a u(t) + b)} < 1. \quad (6.30)$$

Eftersom  $au(t)+b > 0$ , kan olikheten skrivas som

$$c a u(t) + b < a u(t) + b$$

och

$$-a u(t) - b < c a u(t) + b.$$

Den första olikheten ger  $c < 1$ , vilket är uppfyllt och den andra ger att

$$u(t) > -2b/a(1+c). \quad (6.31)$$

Kvotregulatorn med dämpning konvergerar för andra funktioner än tidigare (jfr  $c = 0$ ). Antag att  $y(t+1) = au(t)+b$  är en linjärisering av funktionen  $f(u)$  i konvergenspunkten och då gäller

$$a = f'(u)$$

$$b = f(u) - u f'(u).$$

Efter insättning av dessa uttryck i (6.31) fås efter förenkling att

$$\frac{u f'(u)}{f(u)} < \frac{2}{(1-c)}$$

och dessutom gäller att

$$0 < \frac{u f'(u)}{f(u)}.$$

Av detta uttryck framgår det att dämpningen medför att den lokala förstärkningen  $f'(u)$  kan vara mer än två gånger större än den totala förstärkningen  $f(u)/u$ . Av uttrycket (6.30) framgår det att konvergenshastigheten blir som störst (konvergens i ett steg), när

$$a c u(t) + b = 0$$

eller

$$f'(u)c u + f(u) - f'(u) u = 0$$

eller

$$c = 1 - \frac{f(u)}{f'(u) u}.$$

Vid stora värden på  $f'(u)$  relativt  $f(u)/u$  skall  $c$  väljas nära ett och vid små värden på  $f'(u)$  relativt  $f(u)/u$  borde  $c$  vara negativ.

Sats 3

Kvotregulatorn med dämpning

$$u(t+1) = u(t) (c + (1-c)y_r/y(t+1))$$

ger ett slutet system, där jämviktslösningen  $y(t) = y_r$  är globalt stabil för alla konstanta  $y_r$ , om processfunktionen

$$y(t+1) = g(u(t))$$

uppfyller

$$0 < \frac{g'(u)u}{g(u)} < \frac{2}{(1-c)} . \quad (6.32)$$

Bevis

I sats 2 erhålles global stabilitet för den odämpade kvotregulatorn

$$u(t+1) = u(t)y_r / f(u(t))$$

om olikheten (6.17) är uppfylld,

$$0 < \frac{f'(u)u}{f(u)} < 2$$

I den dämpade kvotregulatorn kan uttrycket

$$(c + (1-c)y_r / g(u(t)))$$

tolkas som

$$y_r / f(u(t))$$

i den odämpade, dvs

$$f(u(t)) = y_r / (c + (1-c)y_r / g(u(t))).$$

Derivering av  $f(u)$  och insättning i (6.32) ger efter förenkling

$$0 < \frac{g'(u)u y_r}{g(u)(c g(u) + (1-c) y_r)} < \frac{2}{(1-c)}.$$

Denna olikhet skall vara uppfylld för alla jämviktspunkter där  $y_r = g(u)$ , dvs

$$0 < \frac{g'(u)u}{g(u)} < \frac{2}{(1-c)}.$$

#### Anmärkning 1

Kvotregulatorn med dämpning konvergerar för alla processer

$$y(t+1) = a u(t)^p$$

om dämpfaktorn väljs så att

$$0 < p < 2/(1-c)$$

är uppfyllt.

#### Anmärkning 2

Kvotregulatorn med  $c = 0,5$ , "rätt" dämpning för alla  $y_r$ , för funktionen  $y(t+1) = au(t)^2$  är helt ekvivalent med den välkända kvadratrotsiterationsformeln

$$x_{n+1} = (x_n + 1/x_n) / 2.$$

I FIG 6.6 återges exempel med olika dämpning.



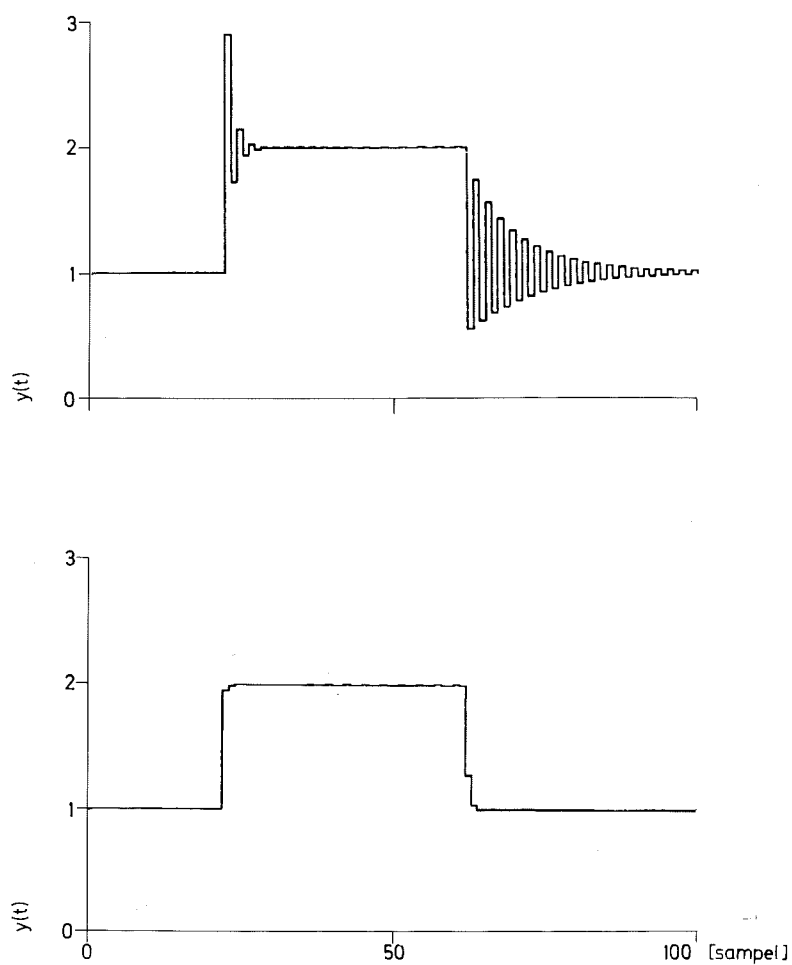


FIG 6.6 - Exempel på kvotregulator utan (kurvan överst) och med (kurvan underst) dämpning. Processen är  $y(t+1) = 1,9 u(t) - 0,9$  och dämpfaktorn 0,5. Referensvärdet har ändrats från 1 till 2 under sampel 20 till 60.

### Känslighet för störningar

Inverkan av brus skall nu undersökas. Följande enkla process analyseras:

$$y(t) = u(t-1) + e(t). \quad (6.33)$$

Bruset  $\{e(t)\}$  antas vara oberoende och normalfördelat och dess medelvärde och varians är 0 resp  $\sigma^2$ . Börvärdet sätts till ett och det slutna system som erhålls då (6.33) regleras med kvotregulatorn (6.14) kan beskrivas som

$$u(t) = \frac{u(t-1)}{y(t)} = \frac{u(t-1)}{u(t-1) + e(t)}. \quad (6.34)$$

Detta är ett olinjärt system och medelvärdet eller variansen för  $u(t)$  kan inte beräknas enkelt.

Vi skall först undersöka vad som händer då  $e(t)$  är små relativt  $u(t)$ . Vid små störningar ( $\sigma^2 \ll 1$ ) är  $u(t)$  nära ett. Ekvation (6.21) kan då approximeras så att följande uttryck fås för insignalen  $u(t)$ :

$$u(t) \approx \frac{1}{1+e(t)} \approx 1 - e(t) + e^2(t) - e^3(t) + \dots \quad (6.35)$$

Det approximativa medelvärdet för  $u(t)$  fås som

$$E u(t) = 1 + E e^2(t) + E e^4(t) + \dots \quad (6.36)$$

Alla udda moment av  $e(t)$  är lika med noll och beräknas de jämna momenten så fås

$$E u(t) = 1 + \sigma^2 + 3 \sigma^4 + 5 \sigma^6 + \dots \quad (6.37)$$

Kvotregulatorn ger alltså ett slutet system med medelvärdesfel vid brus på utsignalen. Variansen för insignalen  $u(t)$  kan beräknas genom att kvadrera ekvation (6.35), vilket ger

$$u^2(t) = 1 - 2e(t) + 3e^2(t) - 4e^3(t) + \dots \quad (6.38)$$

och

$$E u^2(t) = 1 + 3 \sigma^2 + 15 \sigma^4 + \dots \quad (6.39)$$

För variansen gäller att

$$\text{Var}(u(t)) = E(u^2(t)) - E(u(t))^2$$

och approximativt fås

$$\text{Var}(u(t)) \approx 1 + 3 \sigma^2 - 1 - 2 \sigma^2$$

$$\text{Var}(u(t)) \approx \sigma^2.$$

Medelvärde och variansen för utsignalen  $y(t)$  blir

$$E y(t) \approx 1 + \sigma^2$$

$$\text{Var}(y(t)) = 2 \sigma^2.$$

Variansen i utsignalen fördubblas med kvotregulatorn jämfört med ideal reglering  $u(t) \equiv 1$ .

För insignalens fjärde moment erhålles följande approximativa uttryck:

$$E u^4(t) \approx 1 + 10 \sigma^2 + 35 \sigma^4 + \quad (6.40)$$

Hur väl dessa approximativa uttryck stämmer överens med simulerade data framgår av siffrorna i TAB 6.1. Antalet data är 10 000. Brusets standardavvikelse har haft värdena 0,05, 0,1, 0,2 och 0,5. För 0,05 är överensstämmelsen god och för 0,1 likaså, men för 0,2 ökar skillnaden påtagligt och för 0,5 kollapsar kvotregulatorn helt. Detta kan förklaras med att villkoret  $e(t) \ll u(t-1)$  ej är uppfyllt. För  $\sigma = 0,5$  ligger bruset i intervallet  $(-3,3)$ , vilket betyder att utsignalen  $y(t)$  kan bli negativ. Vid simuleringen begränsades  $y(t)$  neråt med 0,001 vid 433 tillfällen av 10 000.

Slutsatsen av den enkla analysen är att mätbrus ger medelvärdesfel vid reglering med kvotregulatorn. Felet är approximativt lika med kvadraten på brus-signal förhållandet. Detta approximativa uttryck gäller endast små brus-signal förhållanden, mindre än 1:10. I FIG 6.7 återges simuleringar för  $\sigma = 0,05, 0,1$  och  $0,2$ . Simuleringarna visar att ett brus-signal förhållande på 1:10 motsvarar kraftiga störningar.

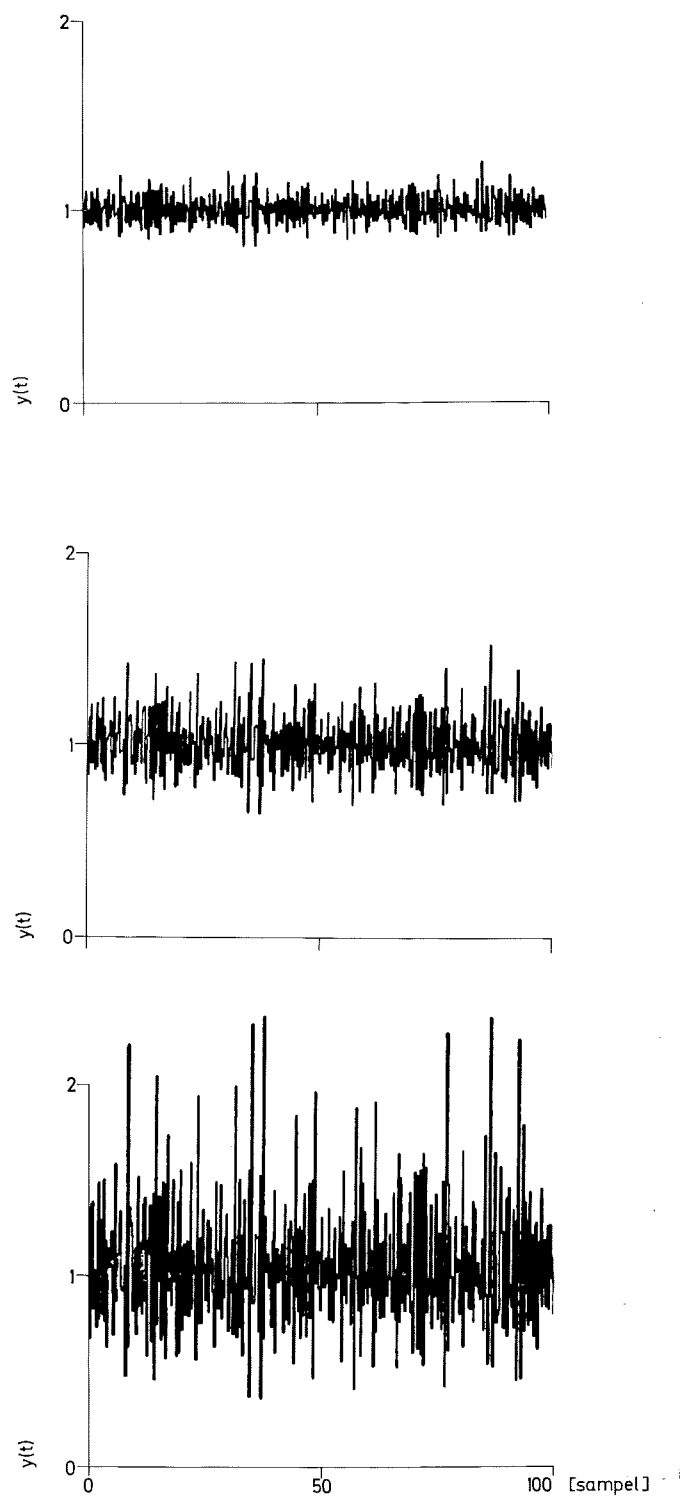


FIG 6.7 - Exempel på reglering av processen  $y(t+1) = u(t) + e(t)$  med kvotregulatorn  $u(t) = u(t-1)/y(t)$ . Brusets standardavvikelse är uppifrån räknat 0,05, 0,1 resp 0,2.

För klimatprocesser är brus-signal förhållandet ofta litet. Brusstörningar i temperaturmätningar överstiger i regel ej  $0,3^{\circ}\text{C}$ . Detta skall jämföras med normala reglerade temperaturökningar på några till tiotals grader. Medelvärdesfelet vid användandet av kvotregulatorn torde därför sällan bli större än  $0,1^{\circ}\text{C}$  vid de flesta klimatprocesserna.

TABELL 6.1. Beräknat och vid simulering erhållet första, andra och fjärde moment för insignalen för olika standardavvikelse på bruset  $\sigma$ . Siffrorna inom parentes är beräknade.

$\sigma$	$Eu$	$Eu^2$	$Eu^4$
0,05	1,003 (1,0025)	1,008 (1,0075)	1,026 (1,025)
0,10	1,011 (1,010)	1,032 (1,031)	1,114 (1,104)
0,20	1,050 (1,045)	1,186 (1,144)	4,966 (1,456)
0,5	30,9	$2,2 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^{10}$

### Egenskaper för linjär dynamisk process

#### Sats 4

Kvotregulatorn ger ett slutet system för ett linjärt system som är lokalt stabilt i en omgivning av jämviktspunkten  $(u_r, y_r)$  om processens pulsöverföringsfunktion uppfyller följande krav:

$$H(z) = h_0 + h_1 z^{-1} + h_2 z^{-2} + \dots$$

$$h_0 = 0$$

$$h_1 > 0,5$$

$$h_i \geq 0 \quad i = 2, 3, \dots$$

$$\sum_{i=1}^{\infty} h_i = 1$$

Bevis

Regulatorn och processekvationen linjäriseras kring jämviktspunkten. Det slutna systemets karakteristiska ekvation fås som

$$z - 1 + zH(z) = 0.$$

Kravet på stabilitet är att alla ekvationens nollställen ligger inuti enhetscirkeln. Då funktionen  $H(z)$  ej är analytisk i origo, görs följande transformation  $z = w^{-1}$ . Den karakteristiska ekvationen kan nu skrivas som

$$w^{-1} - 1 + h_1 + h_2 w + h_3 w^2 \dots = 0.$$

Genom att dela upp ekvationen i två funktioner  $F(w)$  och  $G(w)$  och att tillämpa Rouches sats, som säger att funktionen  $F(w)$  och summan  $F(w) + G(w)$  har samma nollställen i området  $D$  om  $\|F(w)\| > \|G(w)\|$  på randen till  $D$ . I detta fall gäller det att visa att  $F(w)$  och  $F(w) + G(w)$  ej har något nollställe inuti eller på enhetscirkeln. Funktionen  $F(w)$  och  $G(w)$  har valts som

$$F(w) = w^{-1} - 1 + h_1$$

$$G(w) = h_2 w + h_3 w^2 + \dots$$

Funktionen  $F(w)$  har ett nollställe utanför enhetscirkeln och har en pol i origo. Denna pol påverkar ej tillämpningen av Rouches sats, då även summafunktionen  $F(w) + G(w)$  har en pol i origo. Funktionen  $F(w)$  kan på enhetscirkeln uppskattas till att  $\|F(a)\| \geq h_1$ ,  $|a| = 1$ . Genom att utnyttja att alla  $h_i \geq 0$  kan funktionen  $G(w)$  uppskattas till följande:

$$\|G(w)\| < \sum_{i=2}^{\infty} h_i = 1 - h_1.$$

Ett stabilitetskrav blir då

$$h_1 > 1 - h_1$$

$$h_1 > 0,5.$$

Anmärkning 1

Kravet att  $h_0 = 0$  innebär att utsignalen  $y(t)$  ej får bero av insignalen  $u(t)$  annars är processen fysikaliskt orealistisk.

Anmärkning 2

Kravet att alla  $h_i \geq 0$  innebär att processen kan betraktas som ett öppet flödessystem, vilket har ett monotont stegsvar.

Anmärkning 3

Kravet att  $h_1 > 0,5$  innebär att utsignalen skall anta mer än hälften av sitt slutvärde vid i första mätpunkten efter ett steg i insignalen.

Anmärkning 4

Kvotregulatorn  $u(t) = u(t-1)y_r/y(t)$  ger ett slutet stabilt system för en första ordningens process med pulsöverföringsfunktionen  $H(z) = (1-a)/(z-a)$  i en omgivning av jämviktspunkten  $(u_r, y_r)$  för alla  $0 < a < 1$ .

Analogt med beviset för sats 4 fås att den karakteristiska ekvationen för det slutna systemet är

$$z - 1 + z(1-a)/(z-a) = 0.$$

Nollställena kan beräknas som

$$\lambda = a \pm \sqrt{a^2 - a}.$$

Det slutna systemet är stabilt, då nollställena ligger inuti enhetscirkeln. Nollställena är komplexkonjugerade om  $0 < a < 1$ , vilket innebär att det slutna systemet är oscillativt. Realdelen hos nollställena är densamma som hos det öppna systemet, vilket innebär att det slutna systemets utsignal inte har snabbare insvängningsförlopp än det öppna systemet.

Sats 5

Kvotregulatorn ger ett slutet system som är globalt stabilt för jämviktslösningar  $y(t) = y_r$  för alla konstanta  $y_r$  för processen

$$y(t+1) = a y(t) + g(1-a) u(t), \quad 0 < a \leq 0,5, \quad g > 0, \quad u, y, y_r > 0.$$

Bevis

Att visa konvergens för kvotregulatorn

$$u(t+1) = \frac{u(t) y_{\text{ref}}}{a y(t) + (1-a)g u(t)}$$

för processen

$$y(t+1) = a y(t) + (1-a)g u(t)$$

kan ske efter en omskalning av in- och utsignalen så att

$$y'(t) = y(t) / y_{\text{ref}}$$

$$u'(t) = g u(t) / y_{\text{ref}}$$

Konvergens skall nu visas för

$$u'(t+1) = \frac{u'(t)}{a y'(t) + (1-a) u'(t)} \quad (6.41)$$

$$y'(t+1) = a y'(t) + (1-a) u'(t). \quad (6.42)$$

Det är ingen inskränkning att anta att

$$y'(t) = y(t)$$

$$u'(t) = u(t).$$

Av ekvation (6.41) framgår det att insignalen  $u(t)$  är begränsade till intervallet  $(0, 1/(1-a))$ . Samma intervall gäller också utsignalen  $y(t)$ .

Konvergens skall undersökas med ett diskret fasplan. Följande gäller:

$$u(t+1) > u(t) \quad \text{om} \quad a y(t) + (1-a) u(t) < 1$$

$$u(t+1) < u(t) \quad \text{om} \quad a y(t) + (1-a) u(t) > 1$$

$$y(t+1) > y(t) \quad \text{om} \quad u(t) > y(t)$$

$$y(t+1) < y(t) \quad \text{om} \quad u(t) < y(t)$$



I FIG 6.8 har fasplanet ritats upp och man erhåller fyra områden där in- och utsignal beter sig olika. Problemet med ett diskret fasplan är att tidsförloppet beskrivs inte med en kontinuerlig kurva utan med en följd av punkter. I varje område rör man sig moturs kring jämviktspunkten mot nästa område. Det gäller nu att visa att om man startar godtyckligt kommer man efter ett varv att ligga innanför startpunkten.

Antag att man startar på linjen (a,b) i FIG 6.8. På linjen (a,b) gäller att

$$y(t) = a_y = b_y$$

$$a_u < u(t) < b_u.$$

För nästa punkt gäller

$$y(t+1) = a a_y + (1-a) u(t)$$

$$u(t+1) = u(t) / (a a_y + (1-a) u(t)).$$

Punkten  $(u(t+1), y(t+1))$  kan begränsas till följande område:

$$a_y \leq y(t+1) \leq 1$$

$$1 \leq u(t+1) \leq b_u.$$

Antag att man startar på linjen (b,c) i FIG 6.8. På linjen (b,c) gäller att

$$b_y \leq y(t) \leq c_y$$

$$u(t) = b_u = c_u.$$

För nästa punkt gäller

$$y(t+1) = a y(t) + (1-a) b_u$$

$$u(t+1) = b_u / (a y(t) + (1-a) b_u).$$

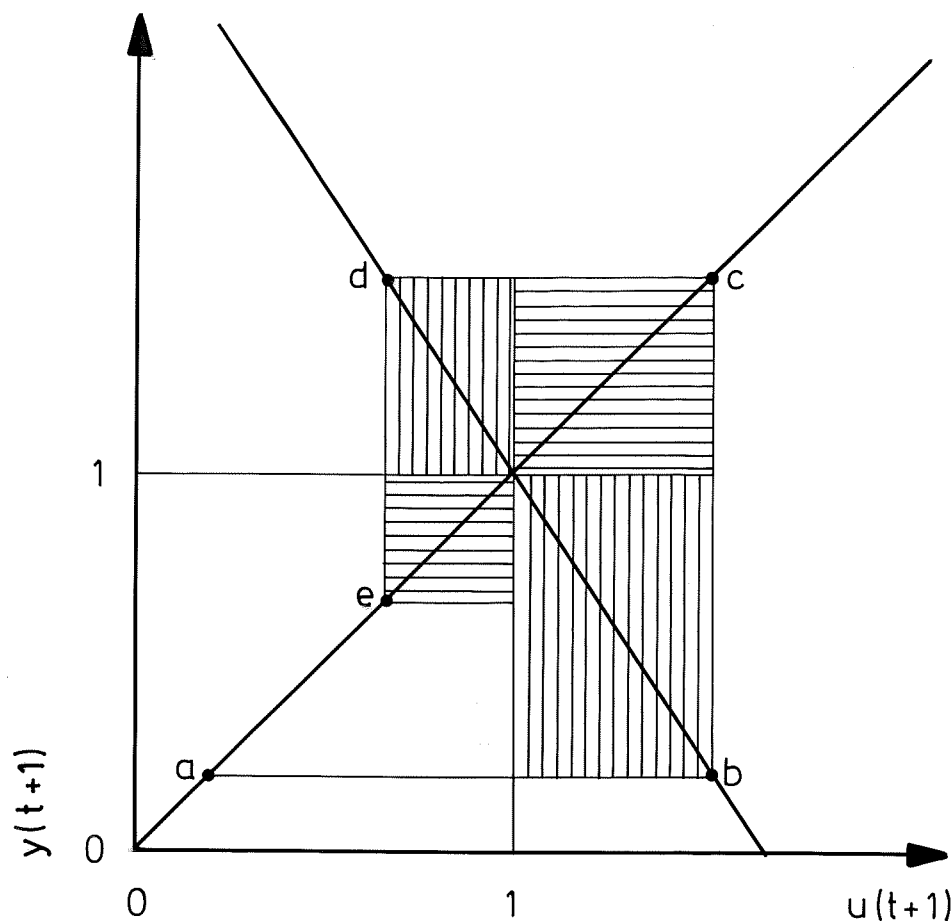


FIG 6.8 - Diskret fasplan för kvotregulatorn  $u(t) = u(t-1)/y(t)$  och processen  $y(t) = ay(t-1) + (1-a) u(t-1)$  för  $a = 0,4$ .

Punkten  $(u(t+1), y(t+1))$  kan begränsas till följande område:

$$1 \leq y(t+1) \leq c_y$$

$$1 \leq u(t+1) \leq c_u.$$

På analogt sätt kan man visa att en start på linjen  $(c,d)$  och  $(d,e)$  slutar i områdena

$$1 \leq y(t+1) \leq d_y$$

$$d_u \leq u(t+1) \leq 1$$

respektive

$$e_y \leq y(t+1) \leq 1$$

$$e_u \leq u(t+1) \leq 1.$$

Sätts de fyra linjerna samman inses att kvotregulatorns konvergensförlopp ligger innanför eller på dessa linjer.

Det återstår nu att visa att

$$a_u = a_y < e_y = e_u.$$

Enkla räkningar ger att

$$b_u = (1 - aa_u)/(1 - a)$$

$$c_y = b_u$$

$$d_u = (1 - ab_u)/(1 - a)$$

$$d_u = e_u$$

$$e_u = \frac{1 - a - a + aa_u}{(1 - a)^2}$$

$$e_u = 1 + \frac{a^2(a_u - 1)}{(1 - a)^2}$$

$$(1 - a_u) \frac{a^2}{(1 - a)^2} = (1 - e_u).$$

Uttrycket  $a^2/(1 - a)^2 < 1$  för  $a < 0,5$  medför att

$$1 - a_u > 1 - e_u$$

$$e_u > a_u.$$

Alltså konvergerar kvotregulatorn. Observera att för  $a = 0,5$  fås likhet  $e_u = a_u$ .

I FIG 6.9 återges tidsförloppet för tre olika dynamiska system av första ordningen.

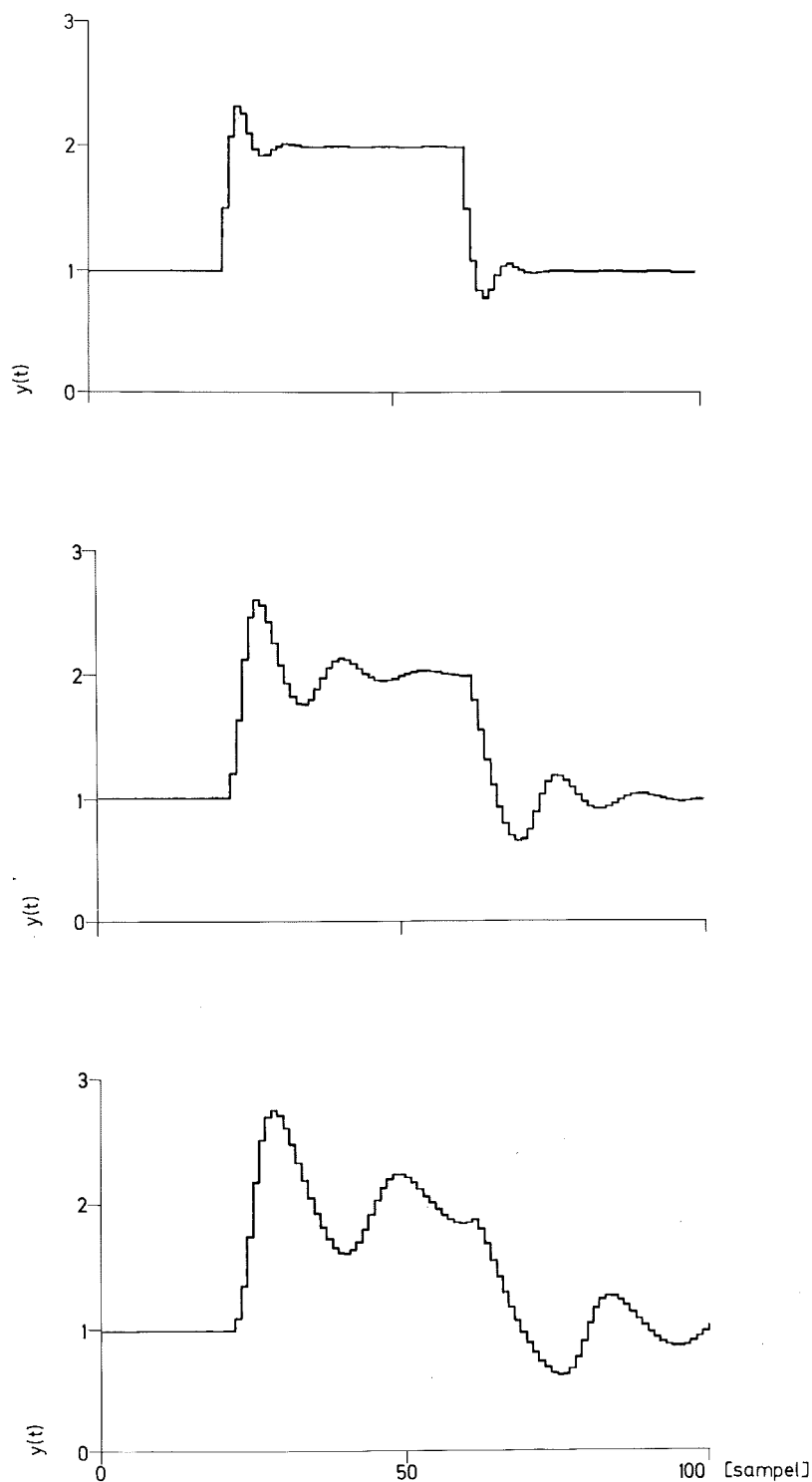


FIG 6.9 - Exempel på insvängningsförlopp med kvotregulatorn för tre olika dynamiska system på formen  $y(t+1) = a y(t) + (1-a) u(t)$ . Kurvorna uppifrån räknat har parametern  $a = 0,5$ ,  $a = 0,8$  resp  $a = 0,9$ . Referensvärdet har ändrats från 1 till 2 från sampel 20 till 60.

### Dynamisk kompensering

Om man har tillgång till en dynamisk modell för en del eller hela processen, kan kvotregulatorn utformas på två sätt. Antag att processen kan skrivas som

$$y(t) = H_1(q^{-1}) H_2(q^{-1}) u(t) \quad (6.43)$$

Här är  $H_1(q^{-1})$  den kända delen av processen. De två alternativen för kvotregulatorn kan skrivas som:

Alt I

$$\begin{cases} u(t) = \frac{z(t-1)}{y(t)} y_r \\ z(t) = [H_1(q^{-1})u(t)] / H_1(1) \end{cases}$$

Alt II

$$\begin{cases} z(t) = \frac{z(t-1)}{y(t)} y_r \\ u(t) = H_1^{-1}(q^{-1})z(t) \end{cases}$$

I alternativ I används processmodellen för att ta hänsyn till att insignalens inverkan på utsignalen är utbredd i tiden.

I alternativ II sker även detta och dessutom beräknas insignalen  $u(t)$  så att utsignalen  $y(t)$  erhåller sitt önskade värde.

Insvängningsförloppen blir helt olika i de två fallen. Om modellerna  $t_{ex}$  är exakta ger alternativ I ett slutet system som svänger in på samma sätt som det öppna systemet. I alternativ II har systemet ställt in sig exakt efter  $n+h$  steg, där  $n$  är ordningstalet och  $h$  tidsfördröjningen.

I FIG 6.10 återges exempel på dynamisk kompensering enligt alt I.

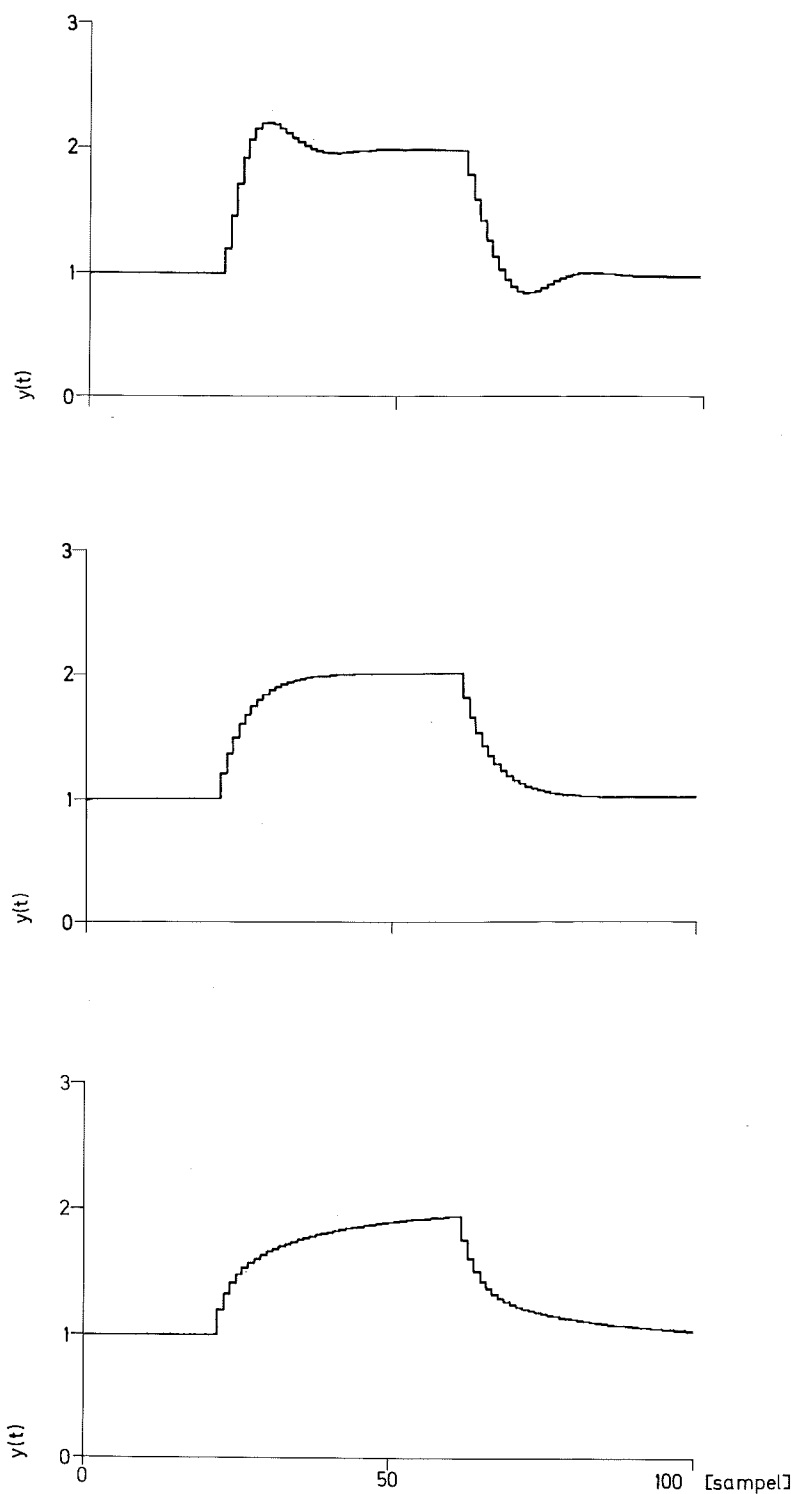


FIG 6.10 - Exempel på kvotregulator med dynamisk kompensering på en process på formen  $y(t+1) = 0,8 y(t) + 0,2 u(t)$ . Kurvorna räknade uppifrån visar en dynamisk kompensering på 0,5, 0,8 resp 0,9. Den mittersta kurvan visar fallet med rätt vald kompensering. Referensvärdet har ändrats från 1 till 2 under sampel 20 till 60.

### Sammanfattning av kvotregulatorns egenskaper

Resultatet från de tidigare avsnitten om kvotregulatorn kan sammanfattas till följande:

Den dämpade kvotregulatorn konvergerar för alla statiska processer

$$y(t+1) = f(u(t))$$

om

$$0 < \frac{f'(u)u}{f(u)} < \frac{2}{(1-c)}, \quad 0 < c < 1 \quad \text{för alla } u > 0.$$

Kvotregulatorn konvergerar lokalt för linjära dynamiska processer vars stegsvar är monotona och där utsignalen antar hälften av sitt slutvärde i första mätpunkten efter ett steg i insignalen.

Kvotregulatorn konvergerar lokalt för alla första ordningens samplade processer med pulsöverföringsfunktionen

$$H(z) = (1-a)/(z-a), \quad 0 < a < 1.$$

Global konvergens fås för systemet ovan när  $0 < a < 0,5$ .

Processens dynamik kan kompenseras så att ett lugnare insvängningsförlopp erhålles. Insvängningsförloppet för det slutna systemet med kvotregulatorn är långsammare än det öppna systemets.

Samplingsintervallet bör väljas så att utsignalen  $y(t)$  beror till mer än hälften av den senaste insignalen  $u(t-1)$ . Detta ger ett lugnare insvängningsförlopp.

## 5. DATORREGLERING

När datorer används för reglering kan många reglerfall angripas annorlunda och effektivare än med analog reglering. Några illustrationer ges i detta avsnitt som behandlar val av reglerprinciper och reglering med normerade reglerstorheter.

### Nya reglerprinciper

Något som ofta glöms bort i samband med implementering av regulatorer är efter vilken reglerprincip den aktuella processen skall regleras. Med en reglerprincip avses här val av variabel som skall regleras för att uppnå önskat resultat. Detta innebär att den primära reglerade storheten transformeras till någon lämpligare storhet att reglera efter eller att en annan lämpligare variabel används som ger önskat resultat. En väl vald reglerprincip medför ofta att reglerproblemen blir små. Ett lämpligt val av reglerprincip kan t ex medföra att parametervariationer undviks. Exempel på reglerprinciper är att reglera blandning av luft eller vatten till en önskad temperatur genom att reglera direkt efter temperatur eller genom att reglera efter blandningsförhållande. Andra exempel är att reglera befuktning efter vatteninnehåll och inte relativ luftfuktighet.

En god reglerprincip grundar sig ofta på något fysikaliskt samband och därför går det inte att ställa upp generella regler för val av reglerprinciper. En reglerprincip kan baseras på en massbalans eller en energibalans. Detta innebär att någon egenskap eller struktur hos den reglerade processen utnyttjas. Detta kan ge ett bättre resultat än rutinmässigt betrakta processen som en svart låda som regleras genom att koppla in en standardregulator till processens primära ut- och insignaler.

En viss ledning för att formulera en reglerprincip kan erhållas genom att undersöka vad som orsakar reglerproblem, t ex förstärkningsvariationer.

Kvotregulatorn som beskrivits ingående i avsnitt 6.4 är ett exempel på att en reglerprincip kan övergå i en reglerstruktur direkt. Kvotregulatorn grundar sig på följande enkla samband:



$$\frac{\text{önskad utsignal}}{\text{nödvändig insignal}} = \frac{\text{erhållen utsignal}}{\text{använd insignal}}$$

Möjligheten att finna en god reglerprincip är större om insignaler till processen är absolutvärden. Insignaler som endast utgörs av ändringar ger ingen information om absolutvärdet. I många fall finns det direkt samband mellan insignalers värde och någon fysikalisk storhet, t ex läge, area, flöde eller effekt.

Ett annat exempel är framkoppling. Reglering av lokaltemperaturen i flerfamiljshus med vattenburen värme sker med enbart framkoppling. Här utnyttjas det faktum att uppvärmningsbehovet i stationärt tillstånd är proportionellt mot temperaturskillnaden inne-ute och att värmeavgivningen från radiatorerna är i stort sett proportionell mot temperaturskillnaden radiatorvatten-rumsluft.

Reglering av kylvattentemperatur sker oftast med framkoppling. Pådraget till kylmaskinen styrs ofta av returtemperaturen. Temperatursänkningen per kylsteg är ganska välkänd. Rätt antal kylsteg kan därför beräknas och ställas ut. Att återkoppling inte förekommer beror på att kylmaskinen är en stegprocess och att något kontinuerligt pådrag inte är möjligt. En PI-regulator skulle bara koppla in och ur det sista steget med påföljande förslitning.

Ett av skälen till att alternativa reglerprinciper ej undersöks är att de kan vara svåra att förverkliga med analogteknik. Ett annat skäl är att även om tekniken inte är ett problem så blir kostnaderna för stora. Ett tredje skäl är att extra givare krävs i vissa fall.

När en dator används för att reglera med, kan dess beräkningskapacitet användas för att beräkna nya processvariabler som är lämpliga för någon reglerprincip. I dessa beräkningar kan alla de uppmätta processvariablerna ingå. Detta medför också att behovet av extra givare kan reduceras. Kostnaderna för att beräkna dessa nya processvariabler är nästan försumbara i jämförelse med att utföra samma beräkning med analogteknik. Exempel på några sådana beräknade processvariabler är:

- blandningsförhållande
- verkningsgrad
- utnyttjningsgrad
- vatteninnehåll
- entalpi (värmeinnehåll)

De tre första exemplen ovan innebär att en normerad reglerstorhet i  $(0,1)$  ersätter den tidigare använda reglerstorheten, vars arbetsområde kan variera med driftsförhållandena. Den normerade reglerstorheten minskar förstärkningsvariation orsakade av olika driftsförhållande. Framkoppling erhålls också. I nästa avsnitt behandlas möjligheterna att använda normerade reglerstorheter.

En fysikalisk särkoppling kan erhållas genom att reglera en befuktare efter vatteninnehåll istället för efter relativ luftfuktighet som beror starkt av luftens temperatur och vatteninnehåll. I kapitel 7, avsnitt 7, behandlas reglering efter vatteninnehåll mera ingående. Samma sak gäller också för reglering efter entalpi.

De flesta börvärdena i en klimatanläggning är fasta bortsett från de börvärden som genereras av kaskadregulatorer. I kapitel 7, avsnitt 7, ges exempel på hur datorn kan användas för att beräkna ett börvärde som i ett fall är driftsekonomiskt lämpligt och som i ett annat fall förbättrar regleringen.

### Reglering med normerade storheter

Värmeväxlaren är en vanlig klimatprocess. Den används för att reglera temperaturen hos ett flöde av luft eller vatten till en önskad temperatur. Värmeväxlaren kan regleras på två olika sätt, nämligen flödesreglering och temperaturreglering. I FIG 6.11 och 6.12 återges en principsskiss för de två regelsätten. Vid flödesreglering regleras det ena flödet så att önskad temperatur erhålles i det andra flödet. Vid temperaturreglering är båda flödena konstanta och det ena flödets temperatur regleras med en cirkulationskrets så att det andra flödets temperatur blir den önskade.

I båda dessa reglerfall bestäms processförstärkningen till stor del av de ingående flödenas temperatur, som i fortsättningen betecknas med  $u_1$  och  $u_2$ . Vid temperaturreglering mäts normalt inte temperatur på det till värmeväxlaren ingående flödet, men här kan man istället använda sig av temperatur på det till cirkulationskretsen inkommande flödet (se FIG 6.12).

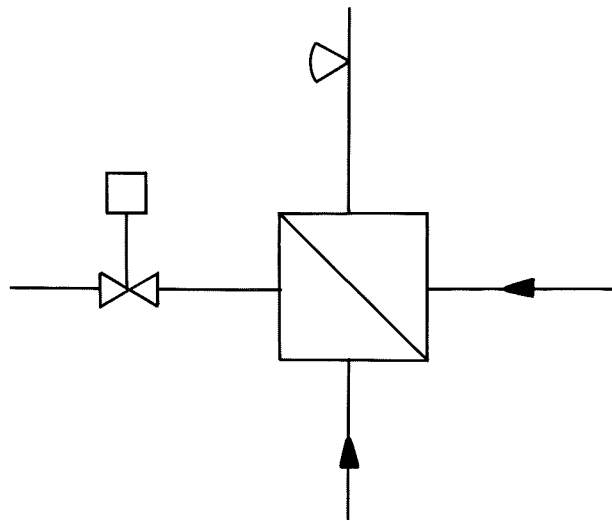


FIG 6.11 - Flödesreglering av värmeväxlare.

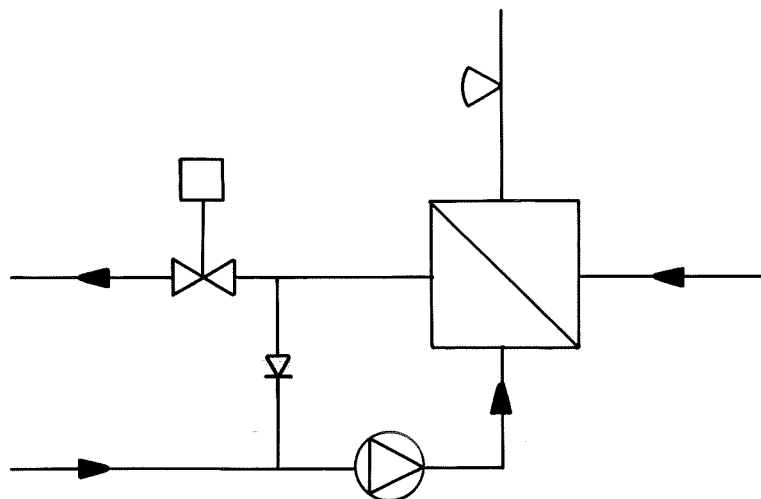


FIG 6.12 - Blandningsreglering av värmeväxlare.

Ett sätt att eliminera den varierande processförstärkningen är att beräkna en utnyttjningsgrad eller en verkningsgrad för värmeväxlaren. Antag att temperaturen  $y$  skall regleras. Den nya normerade reglervariabeln blir då

$$x = \frac{(y - u_1)}{(u_2 - u_1)}$$

och motsvarande börvärde blir

$$x_{\text{bör}} = \frac{(y_{\text{bör}} - u_1)}{(u_2 - u_1)}.$$

En annan vanligt förekommande klimatprocess är blandning. Skillnaden gentemot värmeväxlaren är att båda de ingående flödena varierar och att dess temperaturer är konstanta. Det utgående flödet är i regel konstant och dess temperatur regleras genom att påverka blandningen med spjäll eller ventil. I detta fall är blandningsförhållandet en lämplig normerad storhet att reglera på. Samma formler kan användas som för utnyttjningsgrad eller verkningsgrad.

I samband med blandning av luft kan det ibland vara svårt att placera givaren som skall mäta det utgående luftflödets temperatur, eftersom god blandning av luften krävs före givaren och att den måste vara placerad före eventuella värmare och kylare.

Fördelar med att arbeta med normerade variabler är att regulatorinställningarna är oberoende av de två ingående flödenas temperatur. När det ena flödets temperatur blir större än det andra kan den normerade reglerstorheten fortfarande användas. Vid konventionell reglering måste regulatorförstärkningen byta tecken. Försiktighet bör iakttas i samband med att  $u_1 \approx u_2$  (division med noll).

Eftersom den normerade reglerstorheten innehåller de två ingående flödenas temperatur, ger detta framkoppling.

Den normerade reglerstorheten motsvarar i vissa fall en verkningsgrad och dess storhet ger information om anläggningens driftsläge och även dess kondition.

Vid blandning av uteluft och returluft till tilluft tillåts endast omkring 75 % returluft och detta klaras idag av genom att justera gränslägesbrytare på blandningsspjällen så att önskad funktion erhålls. Efter en viss driftstid med igensättning av filter, ändring av fläktvarvtal och ändring av olika instyppningsspjäll, gäller oftast denna injustering av minsta uteluftmängden inte längre. Sker reglering efter blandningsförhållande ger detta alltid önskat resultat. Denna reglerprincip eliminerar allt behov av injustering.

I många anläggningar finns det redan idag de givare som krävs för att beräkna en normerad reglerstorhet. I de fall då en givare saknas kan den normerade reglerstorheten beräknas med ett värde på den saknade signalen som gör processförstärkning så hög som möjligt. Detta kan tillämpas endast om det ena flödet alltid har lägre temperatur än det andra. I ett sådant fall erhålls viss framkoppling och viss eliminering av förstärkningsvariationer från det uppmätta ingående flödet.

Ett alternativ till att arbeta med en normerad reglerstorhet kan vara att arbeta med en variabel regulatorförstärkning som ges av formeln

$$K_v = \frac{K}{u_2 - u_1}.$$

Enkel analys visar att detta är ekvivalent med att reglera med en normerad storhet för en PID-regulator, eftersom alla de normerade variablerna har nämnaren lika med just  $(u_2 - u_1)$ .

En normerad reglervariabel kan också ersätta självinställande regulatorer genom att förstärkningsvariationerna elimineras. Fördelarna med normerade reglerstorheter kan sammanfattas med punkterna

- förstärkningsoberoende
- framkoppling
- fysikaliskt informativ storhet
- i vissa fall önskad reglerstorhet.

Nackdelarena är i stort sett bara två, nämligen

- extra givare krävs
- vissa enkla beräkningar krävs.

## 6. REFERENSER

- Anderson, B.D.O. och Moore, J.B., 1971: Linear Optimal Control. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Clarke, D.W. och Hastings-James, R., 1971: Design om Digital Controllers for Randomly Distributed Systems. Proc. IEE, 118, pp 1503-1506.
- Fan, L.T., Hwang, Y.S., Hwang, C.L., 1970: Applications of Modern Optimal Control Theory to Environmental Control of Confined Spaces and Life Support Systems. Part 1-5. Building Science 5.
- Jensen, L.H., 1976: Digital reglering av klimatprocesser. Rapport BKL 1976:12.
- Oppelt, W., 1964: Kleines Handbuch Technischer Regelvorgänge. Verlag Chemie GmbH, Weinheim/Bergstr.
- Takahashi, Y., Chan, C.S., Auslander, D.U., 1971: Parameterinstellung bei linearem DDC Algorithmen. Regelungstechnik und Prozess-Datenverarbeitung, Heft 6.
- Ziegler, J.G., Nichols, N.B., 1942: Optimum Settings for Automatic Controllers. Trans. ASME 64, November.
- Aström, K.J., 1970: Introduction to Stochastic Control Theory. Academic Press, New York.
- Aström, K.J., 1973: Reglerteknik. Samplade system. Föreläsningar vid LTH, TLTH/VBV.

## KAPITEL 7

### EXEMPEL PÅ REGLERING

#### 1. INLEDNING

Många experiment med reglering av klimatprocesser har utförts under avhandlingsarbetet. En detaljerad redogörelse för alla experiment finns i separata rapporter som refereras i de olika avsnitten. I detta kapitel presenteras ett urval av experimenten.

Avsikten med experimenten har varit att undersöka hur svårt det är att reglera olika processer samt att belysa vilka typer av regulatorer som lämpar sig för olika regleruppgifter.

Experiment har utförts såväl på enskilda komponenter som på större system. Den utrustning som beskrevs i kapitel 3 har använts genomgående. Fjärrreglering med hjälp av en processdator, placerad på Institutionen för Reglerteknik LTH, och kommunikation via telefonnätet har genomgående utnyttjats.

I avsnitt 2 beskrivs reglering av radiatoruppvärmda rum. Följande regulatorer har använts: till-från, PI, linjärvadratisk och dead-beat. Resultaten konfirmerar de slutsatser som följer av dynamikstudierna i kapitlen 4 och 5, nämligen att den tröga processdynamiken begränsar vad som kan uppnås med regleringen. Radiatorerna kan karakteriseras av storleksordningen 5 minuter. Rummets dynamik blir också trög på grund av det låga luftutbytet. Experimenten visar att enkla regulatorer, såsom till-från eller PI, kan användas och att några nämnvärda förbättringar ej erhålls med mer avancerade regulatorer.

I avsnitt 3 ges några exempel på reglering av ventilerade rum. Experiment har utförts med ett försöksrum, en lektionssal och ett sjukhusrum. I det första fallet undersöks olika typer av till-från reglering. Bästa

resultatet fås när en modell utnyttjas för processen. En dead-beat styrlag används för att avgöra om insignalen till processen skall vara till eller från. Från experimenten med lektionssalen kan man dra samma slutsatser som för det elradiatorvärmda rummet, nämligen att bättre reglering kan erhållas med mer komplicerade regulatorer (men på bekostnad av större styrsignaländringar) och att processdynamiken är långsam, vilket medför att störningar ej kan elimineras på kort tid. Insignalen kan också bli begränsad redan vid måttliga störningar. Experimenten omfattade försök med ingen reglering, en analog PI-regulator, en digital PI-regulator och en linjärvadratisk regulator.

För sjukhusrummet gäller också samma slutsatser som för de övriga rummen. Experimenten med sjukhusrummet är exempel på ren till-från reglering och reglering med pulslängdsmodulerad insignal. Jämförelse har också gjorts med den normala pneumatiska regleringen.

I avsnitt 4 och 5 används kvotregulatorn för tilluftsreglering av ett elektriskt värmebatteri resp en värmepump. I båda fallen användes framkoppling så att temperaturökningen reglerades. Med värmebatteriet visades effekten av olika samplingsintervall, vilket stämmer helt med de teoretiska resultaten i avsnitt 4 i kapitel 6. Med värmepumpen, som är en stegprocess om åtta steg, visas att regleringen kan ske utan att ett steg ständigt kopplas in och ur. Detta inträffar när en PI-regulator används. Prov med och utan dynamisk kompensering utfördes. Antalet in- och urkopplingar blev 4 (minimalt) och 16 för kvotregulatorn med resp utan dynamisk kompensering. Vid ett likartat försök med PI-regulator erhöles 26 in- och urkopplingar. Ett litet antal in- och urkopplingar är önskvärt, då varje in- och urkoppling orsakar ett visst slitage.

Tilluftsreglering med en entalpiväxlare behandlas i avsnitt 6. Regleruppgiften löstes genom att först beräkna aktuell och önskad verkningsgrad, som beräknas med temperaturen för uteluft, returluft och tilluft. Detta ger automatiskt framkoppling. Förstärkningsvariationer orsakade av temperaturskillnader mellan returluft och uteluft elimineras också. Olinjäriteten mellan verkningsgrad och varvtal skattas med en rät linje i arbetspunkten. Den erhållna räta linjen används sedan för att beräkna ett önskat varvtal. Varvtalet regleras med ett lokalt servo. Experimenten visar att en enkel självinställande regulator kan användas för att reglera starkt



olinjära processer. Parametrarna för den räta linjen stämmer också överens med de övriga experimentella och teoretiska resultaten för entalpiväxlare i avsnitt 4 i kapitel 5.

Först i avsnitt 7 diskuteras hur olika luftbehandlingssätt kan regleras med avseende på olika lufttillståndsvariabler. Ett exempel på hur driftskostnader kan minskas genom att beräkna ett börvärde ges också. Sist i avsnittet beräknas ett börvärde som förbättrar regleringen av en elpanna, vars effekt och utgående vattentemperatur skall regleras.

### Experimentteknik

Avsikten med experimenten var främst att jämföra olika regulatorer. Experimenten har därför utförts så att skillnaderna mellan experimenten skulle bli så små som möjligt.

Alla försök med rumslufttemperaturreglering har skett utan att någon människa har befunnit sig i lokalen. Solstörningar har ej heller kunnat inträffa, då försöken ägt rum nattetid. Genom att eliminera dessa två något slumpmässiga störningar har det varit möjligt att jämföra olika försök med samma klimatprocess. I stället har olika belastningar genererats eller börvärdesändringar gjorts. Varje regulator har provats i omkring två timmar.

En yttre störning som inte har kunnat elimineras är uteluften, men för att få så likartade förhållanden som möjligt har försök med olika regulatorer gjorts i en följd. Uteluftens temperaturvariationer är oftast rätt små och långsamma, i synnerhet under natten. Efter en regulator har en annan omedelbart kopplats in. I regulatorer, där en integrator ingår, leder detta till en viss avvikelse i början av försöket innan integratorn i den nya regulatorn har antagit sitt rätta värde. Någon omräkning av den gamla integratorn till den nya har inte gjorts.

En kort och en lång pulsstörning har använts. Den korta pulsstörningen skall bara störa regulatorn. Rumslufttemperaturen antar snabbt sitt ursprungliga värde efter den korta störningen. Värmeutbyte sker mellan rumsluften och väggar, golv, tak och föremål i rummet.

Den längre pulsen ger upphov till en kvarstående temperaturavvikelse om inget regleringrepp görs. En regulator med en integrator skall efter en tid ha eliminerat störningen helt, om insignalen ej är begränsad.

Störamplituden har i regel valts så att processens insignal ej ligger på begränsningarna, vilket skulle omöjliggöra en jämförelse mellan olika regulatorer.

I experimenten med olika fall av tilluftsreglering har börvärdesändringar använts, eftersom några störningar inte gick att generera enkelt.

För att få så likartade betingelser som möjligt mellan regulatorförsök från olika nattkörningar, har den normala regleringen varit inkopplad före och mellan försöksomgångarna. I de fall där det inte fanns någon normal reglering, har insignalen lagts fast till hälften av maxeffekten. Detta val är lämpligt för att regulatorns insignal ej skall begränsas vid små störningar.

Börvärdet för en experimentserie valdes nära det rådande ärvärdet. Utan denna åtgärd hade den första regulatorn fått ta hand om ett startförlopp, vilket inte hade gått att jämföra med de övriga regulatorerna.

Vid start av en försöksomgång kördes i regel den första regulatorn några sampel för att kontrollera regulatoralgoritmen och försöksuppställningen. Därefter startade själva programstyrningen och mätdatainsamlingen.

För att bedöma om rumslufttemperaturreglering är nödvändig har alltid ett experiment utan någon reglering utförts för varje rum när så har varit möjligt.

## 2. RADIATORUPPVÄRMDA RUM

I detta avsnitt behandlas experiment med ett elradiatoruppvärmt försöksrum och ett vanligt flerbostadshus uppvärmt med vattenradiatorer. En detaljerad beskrivning av de olika experimenten ges i Jensen och Ljung (1973) och i Apelblat, Jensen och Rydström (1977).

### Experiment med försöksrum

För experimenten användes ett av försöksrummen vid Institutionen för Byggnadskonstruktionslära, LTH. Några data om detta:

längd	4.5 m
bredd	3.6 m
höjd	3.0 m
golv, tak	betong
mellanväggar	lättbetong
fönster 2-glas	7.6 m <sup>2</sup>

För ytterligare detaljer om försöksrummet, se Adamson (1969). Rummet var omöblerat och ventilerades ej. Temperaturen i rummet reglerades med två tyristorstyrda elradiatorer med maximal effekt på 2 kW. Lufttemperaturen mättes mitt i rummet på 1.5 meters höjd över golvet.

### Modell

En matematisk modell bestämdes med hjälp av processidentifiering. Vid experimentet användes en samplingsperiod på 1 minut. Genom att använda de metoder som beskrivits i avsnitt 3 i kapitel 4 erhöles följande modell:

$$y(t+1) = 1.664 y(t) - 0.683 y(t-1) + 0.0488 u(t-3) + 0.0042 u(t-4). \quad (7.1)$$

$y(t)$  är avvikelser i rumslufttemperatur från medelvärdet i °C och  $u(t)$  är effekten i kW kring medeleffekten 1 kW. Ingen effekt motsvaras av  $u(t) = -1$  och maximal effekt 2 kW motsvaras av  $u(t) = 1$ .

Modellens tidskonstanter är omkring 5 min och 10 min och dess tidsfördröjning är 3 min. Modellens förstärkning är 2.7 °C, vilket innebär att rumslufttemperaturen kan ändras 2.7 °C vid en ändring av effekten med 1 kW. Modellen visar att stora snabba störningar ej kan elimineras.

### Reglersätt

Flera olika regulatorer provades och fem av dessa redovisas. Till-från reglering approximerades med en P-regulator med hög förstärkning.

Regulatorns utsignal blir för det mesta mättad. Gemensamt för de fyra följande regulatorerna är att utsignalen har filtrerats som

$$y_f(t) = (3y(t) + 2y(t-1) + y(t-2))/6.$$

Vidare har integralen, som betecknas  $\tilde{y}_f(t)$ , ej uppdaterats vid temperaturavvikelser större än  $0.6^\circ\text{C}$  och samtidigt har ren till-från reglering skett vid avvikelser större än  $0.6^\circ\text{C}$ . En PI-regulator ställdes in enligt Ziegler-Nichols regel. Modellen användes för att finna den kritiska förstärkningen och frekvensen. Regulatorn blev

$$u(t) = -1.725 y_f(t) + 0.225 y_f(t-1) - 0.0111 \tilde{y}_f(t). \quad (7.2)$$

En annan PI-regulator bestämdes direkt genom simulering av modellen till

$$u(t) = -3.30 y_f(t) + 2.20 y_f(t-1) - 0.092 \tilde{y}_f(t) \quad (7.3)$$

Två linjärvadratiska regulatorer togs fram: en med stort straff på insignalen

$$\begin{aligned} u(t) = & -3.10 y_f(t) + 2.02 y_f(t-1) \\ & -0.093 \tilde{y}_f(t) - 0.141 u(t-1) \\ & -0.156 u(t-2) - 0.012 u(t-3) \end{aligned} \quad (7.4)$$

och en med litet straff på insignalen

$$\begin{aligned} u(t) = & -7.27 y_f(t) + 4.60 y_f(t-1) \\ & -0.273 \tilde{y}_f(t) - 0.241 u(t-1) \\ & -0.323 u(t-2) - 0.012 u(t-3). \end{aligned} \quad (7.5)$$

### Experiment

Reglerförsöken omfattade 200 minuter under vilka uteluft blåstes in mellan den 20:e och 25:e minuten och en strålkamin på 500 W var påslagen mellan den 80:e och den 140:e minuten. I figurerna 7.1 - 6 anges kallluftsinsblåsningen med intervallet A,B och för värmetillskottet gäller beteckningarna C,D. Före en försöksserie var uppvärmningseffekten konstant 1 kW i minst 6 timmar.

Samplingsintervallet var 1 minut. Sex olika försök redovisas i figurerna 7.1 - 6 och de är:

experiment nummer	FIG		
1	7.1	ingen reglering	
2	7.2	till-från reglering	
3	7.3	PID-regulator inställd enligt Ziegler-Nichols regel	(7.2)
4	7.4	PID-regulator bestämd genom simulering	(7.3)
5	7.5	linjärvadratisk regulator med stort straff på insignalen	(7.4)
6	7.6	linjärvadratisk regulator med litet straff på insignalen	(7.5)

Hur uteluftsinsblåsningen under fem minuter och det extra värmertilskottet under en timme påverkar rumslufttemperaturen framgår klart vid försöket utan reglering i FIG 7.1. Efter den korta uteluftsinsblåsningen sker ett värmeutbyte mellan väggar, golv, tak, föremål i rummet och rumsluften så att jämvikt åter uppnås. Förhållandet i värmekapacitet mellan rumsluften och de omgivande massorna är ungefär 1 till 100.

När det extra värmertilskottet tillförs kan avvikelser i rumslufttemperatur ej slås ner omedelbart på grund av tidsfördröjning i processen, vilket kommer att framgå av de olika försöken.

De två störningarna kan inte beskrivas med modellen, ty modellen beskriver endast sambandet mellan elradiatorernas effekt och rumsluftens temperatur. Vid uteluftsinsblåsning ändras processen genom att luft strömmar in och ut genom rummet. Detta framgår av diskussionen av matematiska modeller i kapitel 5. I experimentet genereras det extra värmertilskottet genom att tillföra värme med enkel värmekamin. Den är snabbare än de elradiatorer som används för regleringen.

Till-från regleringen i FIG 7.2 ger svängningar i rumslufttemperaturen med en amplitud på omkring  $0.5^{\circ}\text{C}$ . Vidare framgår det att till-från regleringen har ett medelvärdesfel. Medeltemperaturen är högre när extra värme tillförs rummet, vilket stämmer med resultaten i kapitel 6, avsnitt 2.

En regulator inställd efter Ziegler-Nichols regel skall vara något oscillativ, vilket framgår av FIG 7.3. Ett något bättre resultat fås om parametrarna bestäms genom simulering (se FIG 7.4).

Skillnaden mellan de två linjärvadratiska regulatorerna framgår klart av FIG 7.5 och FIG 7.6. I det första fallet är insignaländringarna små och utsignalen svänger långsamt in sig. Tvärtom är förhållandena med den andra linjärvadratiska regulatorn. Detta visar att linjärvadratisk reglerteori kan användas för att ta fram regulatorer med önskade egenskaper.

### Slutsatser

I tabell 7.1 finns en utvärdering av reglerförsök för två olika perioder: en efter uteluftinblåsningen och en omfattande det extra värmetillskottet. Utsignalens största avvikelse, dess rotmedelkvadrat och insignalens standardavvikelse har beräknats.

Den bästa regulatorn med hänsyn tagen till endast utsignalen är den andra linjärvadratiska regulatorn med litet straff på insignalen. Insignalens standardavvikelse, som anger hur mycket regulatorn varierar insignalen, är däremot minst för den första linjärvadratiska regulatorn med stort straff på insignalen. PID-regulatorerna har något sämre värden.

Siffrorna i tabell 7.1 säger inte allt utan en jämförelse mellan reglerförsök bör också göras med hjälp av kurvorna i FIG 7.1 - 6. Siffermässigt är skillnaden mellan de två PID-regulatorerna ej särskilt stor, men tidsförloppen i FIG 7.3 och FIG 7.4 visar att PID-regulatorn bestämd med Ziegler Nichols regel är något oscillativ och I-delen är något för liten.

En slutsats av reglerförsöken är att till-från reglering kan användas om temperaturvariationer på  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  kan tolereras. Förutom den periodiska avvikelsen tillkommer ett medelvärdesfel som beror på belastningen. Med PID- och linjärvadratiska regulatorer har försöken visat att det är möjligt att reglera med temperaturavvikelser på  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  vid måttlig belastningsändring och med en noggrannhet av  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$  utan belastningsändring.

Tabell 7.1 - Utvärdering av regulatorer.

Tidsperiod 1: från 31:a till 60:e minuten,

Tidsperiod 2: från 61:a till 175:e minuten.

A: rotmedelkvadratfelet för utsignalen i °C

B: standardavvikelsen för insignalen i kW

C: största absolutfelet för utsignalen i °C

Med utsignalen avses här ej det filtrerade värdet  $y_f(t)$  utan det uppmätta  $y(t)$ .

Experiment nummer	Figur	Tidsperiod 1		Tidsperiod 2		Regulator
		A	B	A	C	
1	7.1	0.516	0.000	0.707	1.192	ingen
2	7.2	0.367	0.998	0.288	0.586	till-från
3	7.3	0.301	0.416	0.222	0.510	PID (7.2)
4	7.4	0.387	0.116	0.183	0.492	PID (7.3)
5	7.5	0.098	0.065	0.227	0.554	linjärkvadratisk (7.4)
6	7.6	0.112	0.215	0.151	0.492	linjärkvadratisk (7.5)

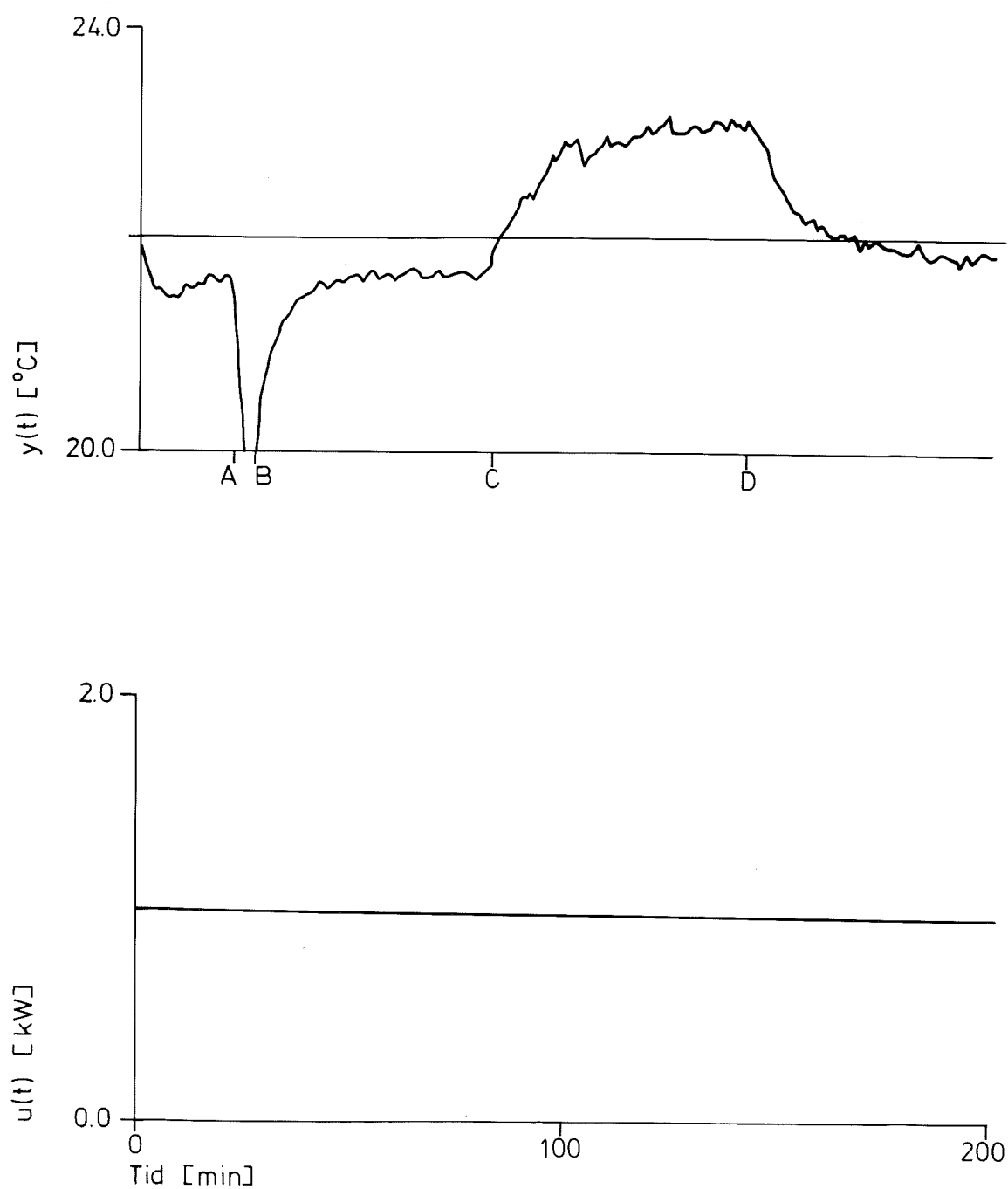


FIG 7.1 - Experiment med elradiatorvärmt rum utan reglering.  $y(t)$  betecknar rumslufttemperatur i  $^{\circ}\text{C}$ . Börvärdet är  $22^{\circ}\text{C}$ .  $u(t)$  betecknar tillförd effekt i kW. Intervallet A,B och C,D anger när uteluft blåstes in i rummet resp när ett extra värmeelement på 500 W var inkopplat.



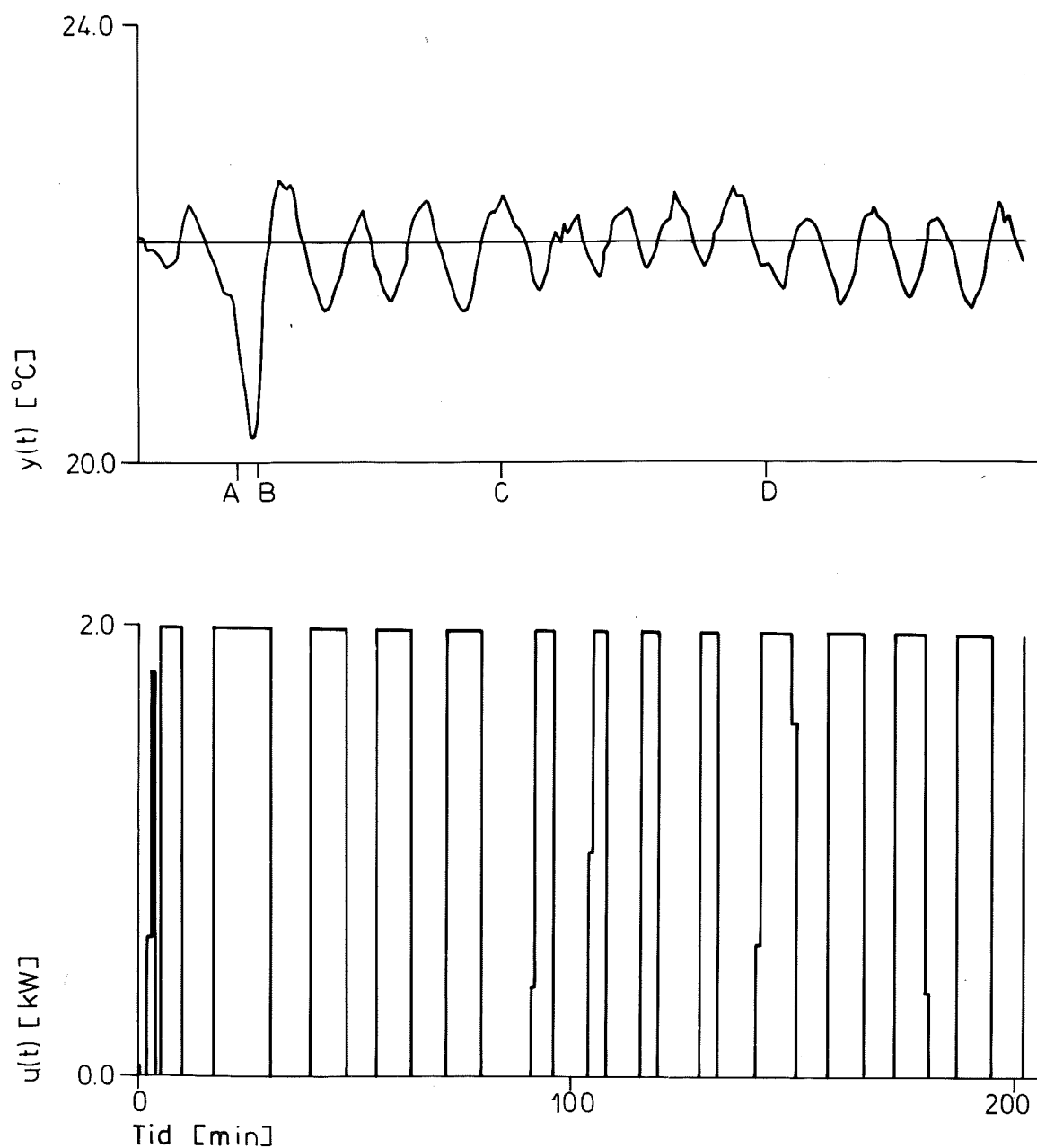


FIG 7.2 - Experiment ett elradiatorvärmt rum och ren till-från reglering.  $y(t)$  betecknar rumslufttemperatur i  $^{\circ}\text{C}$ . Börvärdet är  $22^{\circ}\text{C}$ .  $u(t)$  betecknar tillförd effekt i kW. Intervallet A,B och C,D anger när uteluft blåstes in i rummet resp när ett extra värmeelement på 500 W var inkopplat.

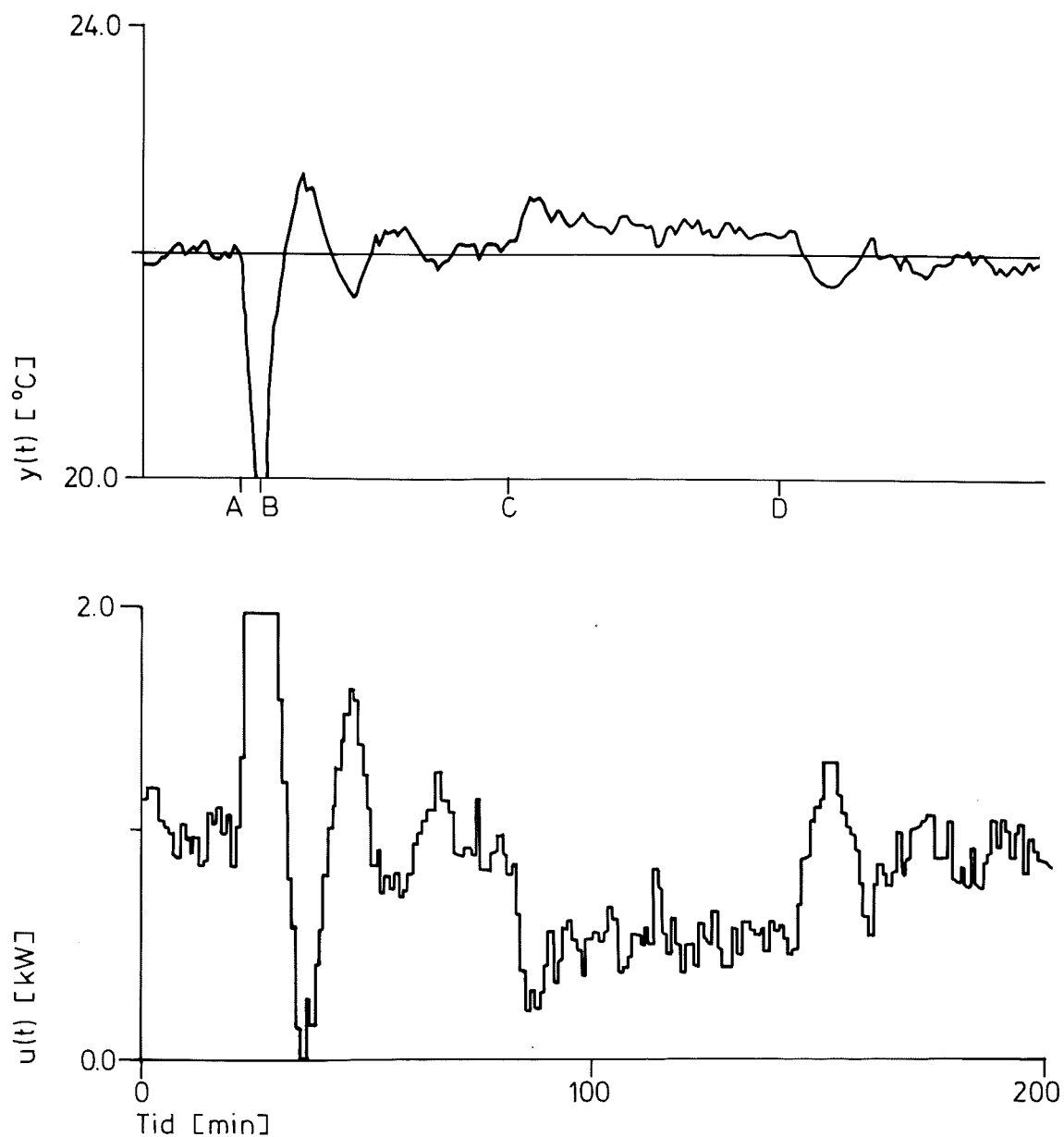


FIG 7.3 - Experiment med ett elradiatorvämt rum och en PID-regulator (7.2) inställd efter Ziegler-Nichols regel.  $y(t)$  betecknar rumslufttemperatur i  $^{\circ}\text{C}$ . Börvärdet är  $22^{\circ}\text{C}$ .  $u(t)$  betecknar tillförd effekt i kW. Intervallet A,B och C,D anger, när uteluft blåstes in i rummet resp när ett extra värmeelement på 500 W var inkopplat.

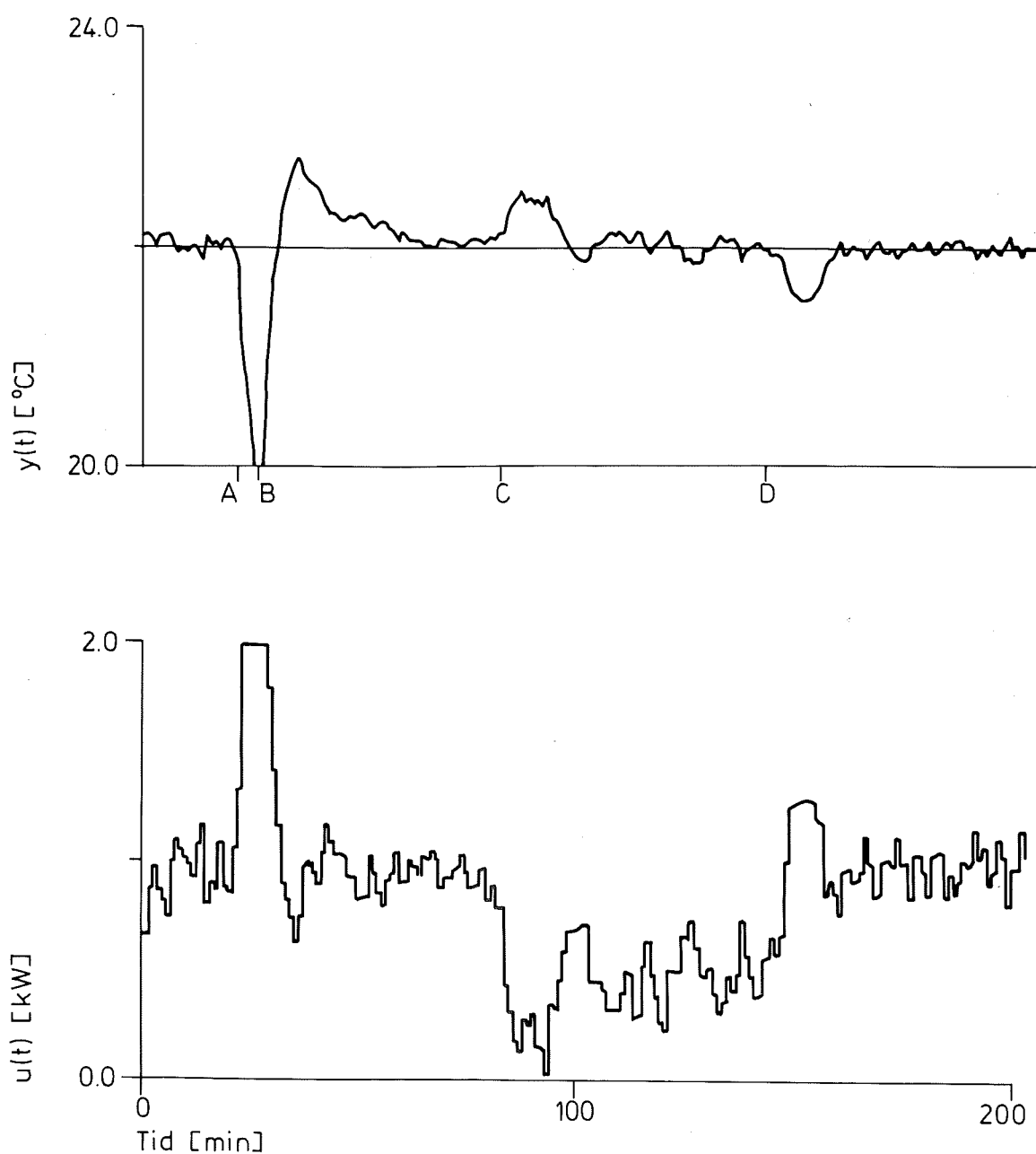


FIG 7.4 - Experiment med ett elradiatorvärt rum och en PID-regulator (7.3) bestämd genom simulering.  $y(t)$  betecknar rumslufttemperatur i  $^{\circ}\text{C}$ . Börvärdet är  $22^{\circ}\text{C}$ .  $u(t)$  betecknar tillförd effekt i kW. Intervallet A,B och C,D anger, när uteluft blåstes in i rummet resp när ett extra värmeelement på 500 W var inkopplat.

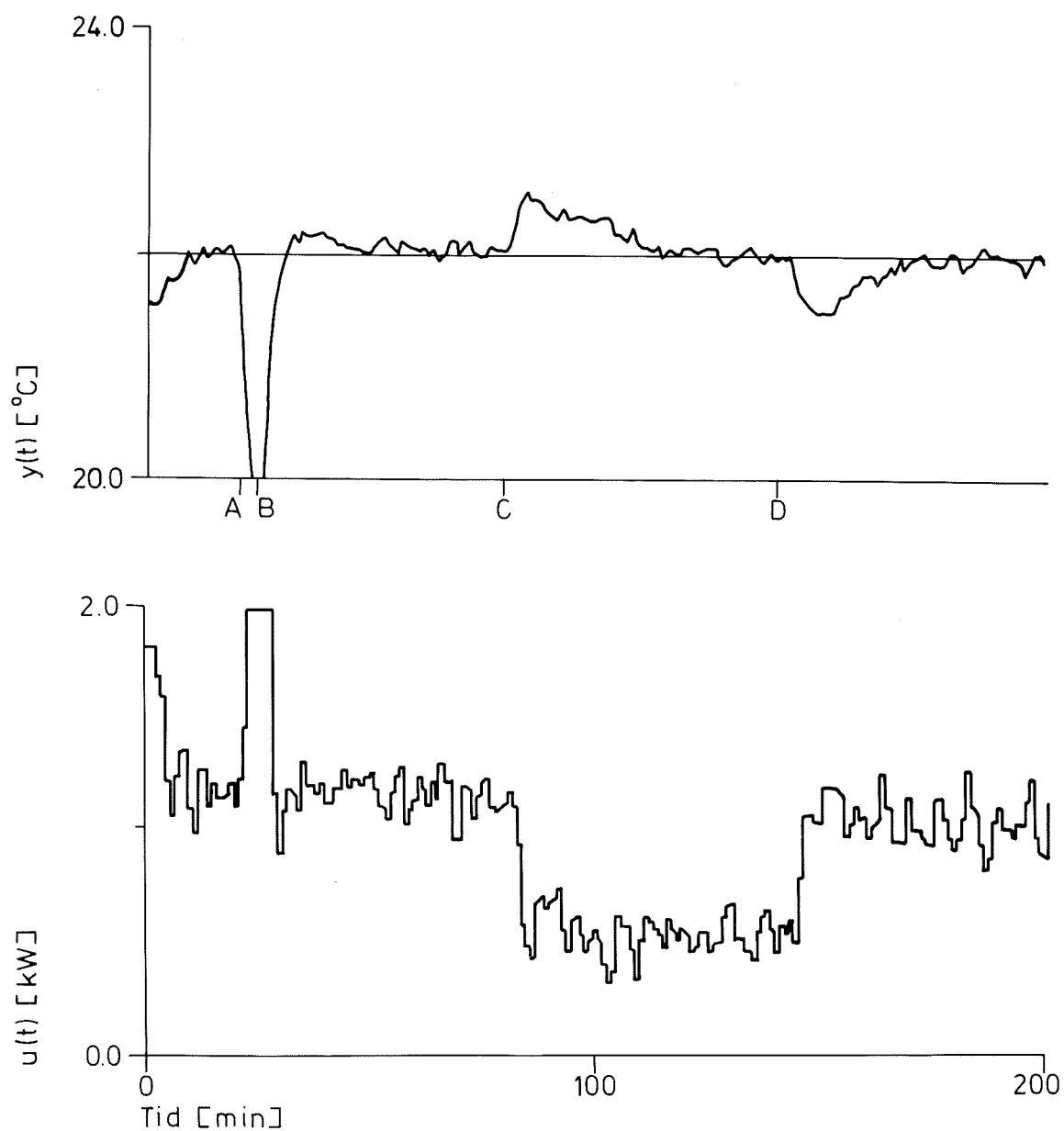


FIG 7.5 - Experiment med ett elradiatorvämt rum och en linjärvadratisk regulator (7.4) med stort straff på insignalen.  $y(t)$  betecknar rumslufttemperatur i  $^{\circ}\text{C}$ . Börvärdet är  $22^{\circ}\text{C}$ .  $u(t)$  betecknat tillförd effekt i kW. Intervallet A,B och C,D anger när uteluft blåstes in i rummet resp när ett extra värmeelement på 500 W var inkopplat.

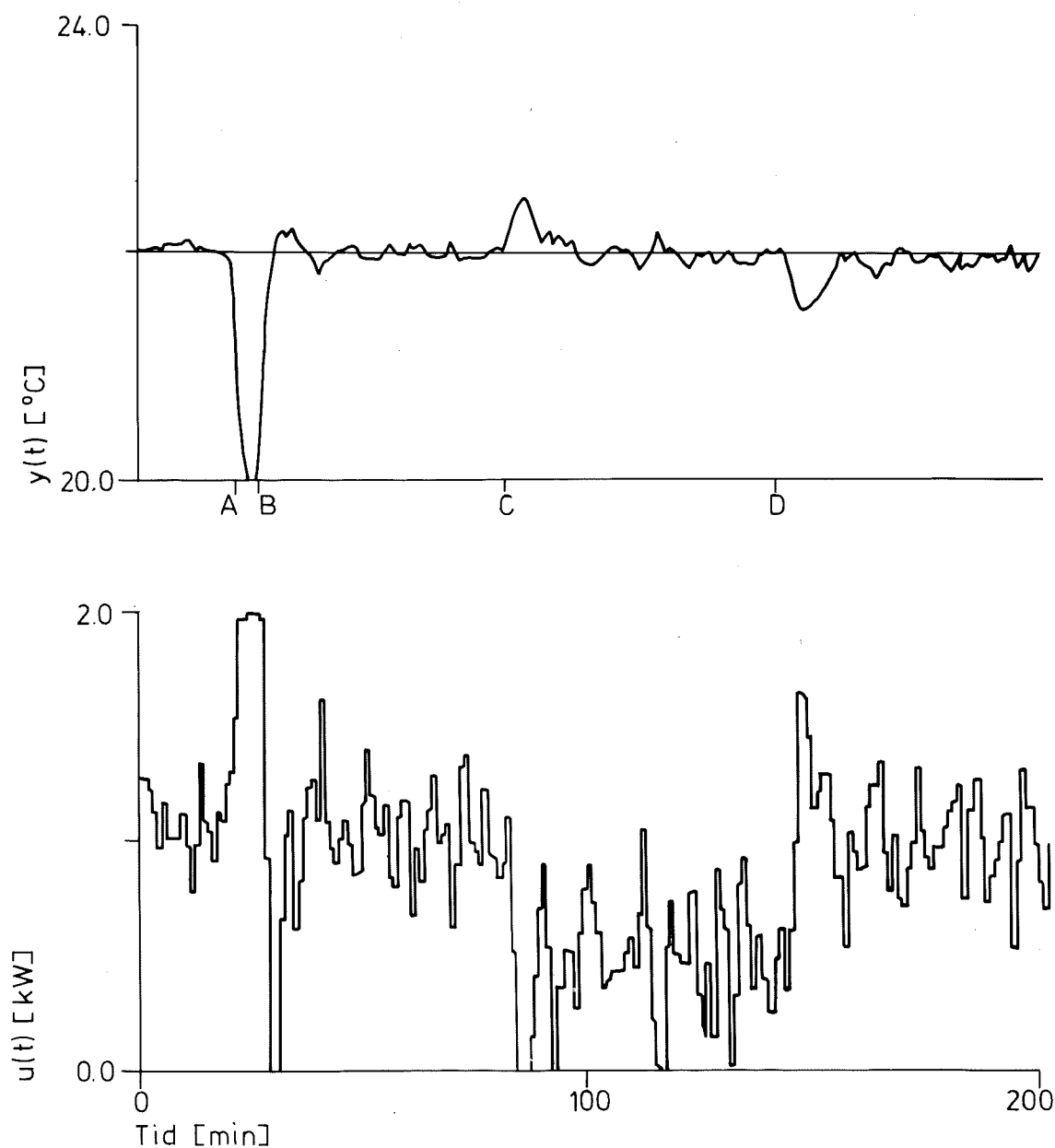


FIG 7.6 - Experiment med ett elradiatorvämt rum och en linjärvadratisk regulator (7.5) med litet straff på insignalen.  $y(t)$  betecknar rumslufttemperatur i  $^{\circ}\text{C}$ . Börvärdet är  $22^{\circ}\text{C}$ .  $u(t)$  betecknar tillförd effekt i kW. Intervallet A,B och C,D anger när uteluft blåstes in i rummet resp när ett extra värmeelement på 500 W var inkopplat.

### Experiment med flerfamiljshus

Temperaturregleringen i ett flerfamiljshus med vattenburen värme sker i de flesta fall endast med framkoppling från utetemperaturen till radiatorernas tilloppstemperatur. Någon återkoppling från lokaltemperatur finns som regel ej. I detta avsnitt görs en jämförelse mellan nuvarande reglersätt och ett förbättrat reglersätt, som kan ge en väsentlig energibesparing. I FIG 7.7 visas en principskiss över det normala och det här föreslagna reglersättet. Reglerexperiment utfördes med ett åtta-vånings bostadshus innehållande 72 lägenheter. Experimenten finns utförligt beskrivna i Apelblat, Jensen och Rydström (1977).

### Konventionell reglering

Givaren för utomhustemperaturen, som framkopplingen baseras på, är normalt placerad på husets norrsida. Detta medför att framkopplingen inte kan ta hänsyn till sol, vind, personbelastning och värmeutveckling från hushållsmaskiner.

Det är svårt att välja rätt reglerkurva, eftersom utetemperaturen varierar långsamt och inom ett begränsat intervall under en kortare tidsrymd. Injusteringsarbetet försvåras också av olika störningar och av den långsamma dynamiken. Resultatet kan bara kontrolleras med manuell avläsning. För att undvika klagomål ställs temperaturen ofta något högre än vad som är projekterat. En injustering bör omfatta två kontroller: en vid hög utetemperatur och en vid låg. Konstruktionsdata ger ofta en alltför hög reglerkurva på grund av överdimensionering.

Exempel på temperaturvariationer vid den normala regleringen visas i FIG 7.8 och FIG 7.9. Registreringen i FIG 7.8 har gjorts under en vecka med en samplingsperiod av 1 timme. Korttidsvariationerna framgår av FIG 7.9 där samplingsperioden varit 1 minut.

### Förbättrad reglering

Problemen med att enbart använda framkoppling kan elimineras med återkoppling. Frånluftstemperaturen från kök och badrum är en lämplig signal för återkopplingen. Luften som sugas ut från kök och badrum har ju i regel också passerat övriga rum i lägenheten. Mätningar visar att frånluften

i regel är något varmare än rumsluften, vilket beror på att frånluften ofta sugts ut nära innertaket. En fördel med frånluften är att den ger ett medelvärde för ett stort antal lägenheter, om den mäts nära utblåsningen.

Fördelarna med att använda både fram- och återkoppling är att framkopplingstermen ej behöver vara noggrannt vald eller inställd, komforten blir bättre (jämnare temperatur) och medeltemperaturen kan sänkas närmare klagogränsen. Detta innebär att uppvärmningsbehovet minskar och därmed också energiåtgången. En annan fördel är att temperatursänkning under natten kan ske till önskad nivå. Normalt sänks radiatorernas tilloppstemperatur under natten med ett fast värde, vilket framgår i FIG 7.9.

Experiment med dels enbart återkoppling och dels både fram- och återkoppling utfördes. Det visade sig att snabba ändringar i utetemperaturen ej kan klaras med enbart återkoppling. Experimenten visade också att frånlufttemperaturen kan regleras med en noggrannhet på  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ , vilket är bättre än vad som behövs. Den stora underslängen i början av reglerexperimentet beror på att integralen i regulatorns återkopplingsdel ej begränsades i den regulator som användes under experimenten.

Det är en markant skillnad mellan den konventionella regleringen och reglering med både fram- och återkoppling. Detta framgår t ex av FIG 7.9 och FIG 7.10. Betrakta t ex FIG 7.9, som visar konventionell reglering. Yttertemperaturen,  $y_4$  i figuren, stiger mot eftermiddagen.

Radiatorernas tilloppstemperatur sänkes något på grund av framkopplingen, men ligger ändå väl högt (ca  $40^{\circ}$ ). Temperaturen i rummet ( $y_1$  i figuren) stiger kraftigt mot slutet på grund av en kombination av hög yttertemperatur och solstrålning. Jämföres detta förlopp med FIG 7.10 ser man klart nyttan av återkoppling. Återkopplingen medför att radiatorernas tilloppstemperatur sänkes drastiskt till ca  $23^{\circ}\text{C}$ . Mot slutet av perioden vid  $t = 1000$  min sker dock en höjning av rumstemperaturen på grund av solstrålning. Denna störning kan ej regleras bort, ty radiatortemperaturen går ej att sänka ytterligare.

Följande enkla PI återkoppling användes under experimenten:

$$- 40 e(t) - 1.2 \tilde{e}(t).$$

Här är  $e(t)$  reglerfelet och  $\tilde{e}(t)$  summan av tidigare reglerfel. Vid en temperaturändring på  $1^{\circ}\text{C}$  ändras börvärdet för radiatorernas tillopps-temperatur mer än  $40^{\circ}\text{C}$ . Måttliga avvikelser i frånluftstemperaturen leder till att radiatorsystemet ofta kan vara helt avstängt, vilket också framgår av experimentet med datorreglering i FIG 7.10.

### Energibesparing

Med den reglering som är vanlig idag förekommer det temperaturvariationer på en grad eller mer (se FIG 7.8). Stora övertemperaturer torde vädras bort. Det går därför inte att fastställa hur stora övertemperaturerna egentligen skulle vara om vädring icke förekom. Den besparing som skulle kunna uppnås med sänkning av medeltemperaturen en grad, blir åtminstone  $200 \cdot 1 = 200$  graddagar, dvs en besparing på några procent (en eldnings-säsong omfattar 200 dagar och 3000 - 4000 graddagar).

Det finns omkring 2 milj lägenheter med vattenburen värme fördelade på omkring 100 000 bostadshus. Dessa lägenheter förbrukar ca 24 TWh för uppvärmning till en kostnad av ca 2400 milj kr, om man antar att priset per kWh är 10 öre. En besparing på 2 till 4 % ger totalt en besparing på 50 - 100 milj kr.

En reglerutrustning med återkoppling, extra givare och kabel torde kosta knappt 2000 kr mer än den nuvarande reglerutrustningen, som kostar mellan 4000 och 5000 kr. I ett större flerfamiljshus med omkring 100 lägenheter ligger uppvärmningskostnaden på omkring 50 000 kr. En besparing på 4 %, dvs 2000 kr förräntar investeringen på ett år.

### Slutsatser

Fördelarna med att införa en återkoppling från frånluftstemperaturen kan sammanfattas med

- jämnare rumslufttemperatur
- energibesparing
- rätt nattsänkning
- lätt att justera in.

Nackdelarna är att



- ventilslitaget kan öka
- installationskostnaderna blir högre
- radiatortemperaturen blir oberoende av utetemperaturen (risk för klagomål)
- värmebehovet blir ej oberoende av utetemperaturen (prognosproblem för fjärrvärmeproducent)

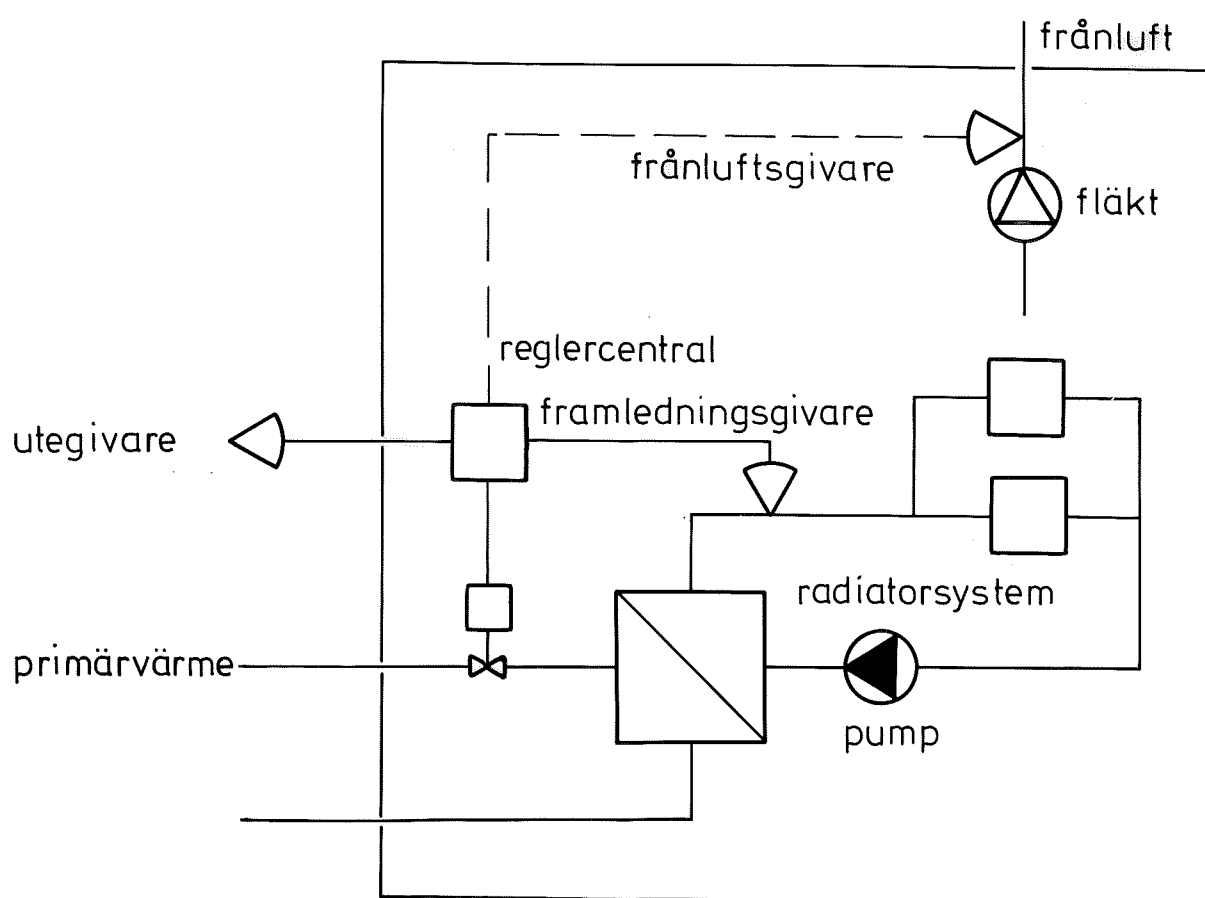


FIG 7.7 - Principskiss för temperaturreglering av flerbostadshus. Frånluftsgivaren är den enda yttre skillnaden mellan det nuvarande reglersättet och det nya reglersätt som provats.

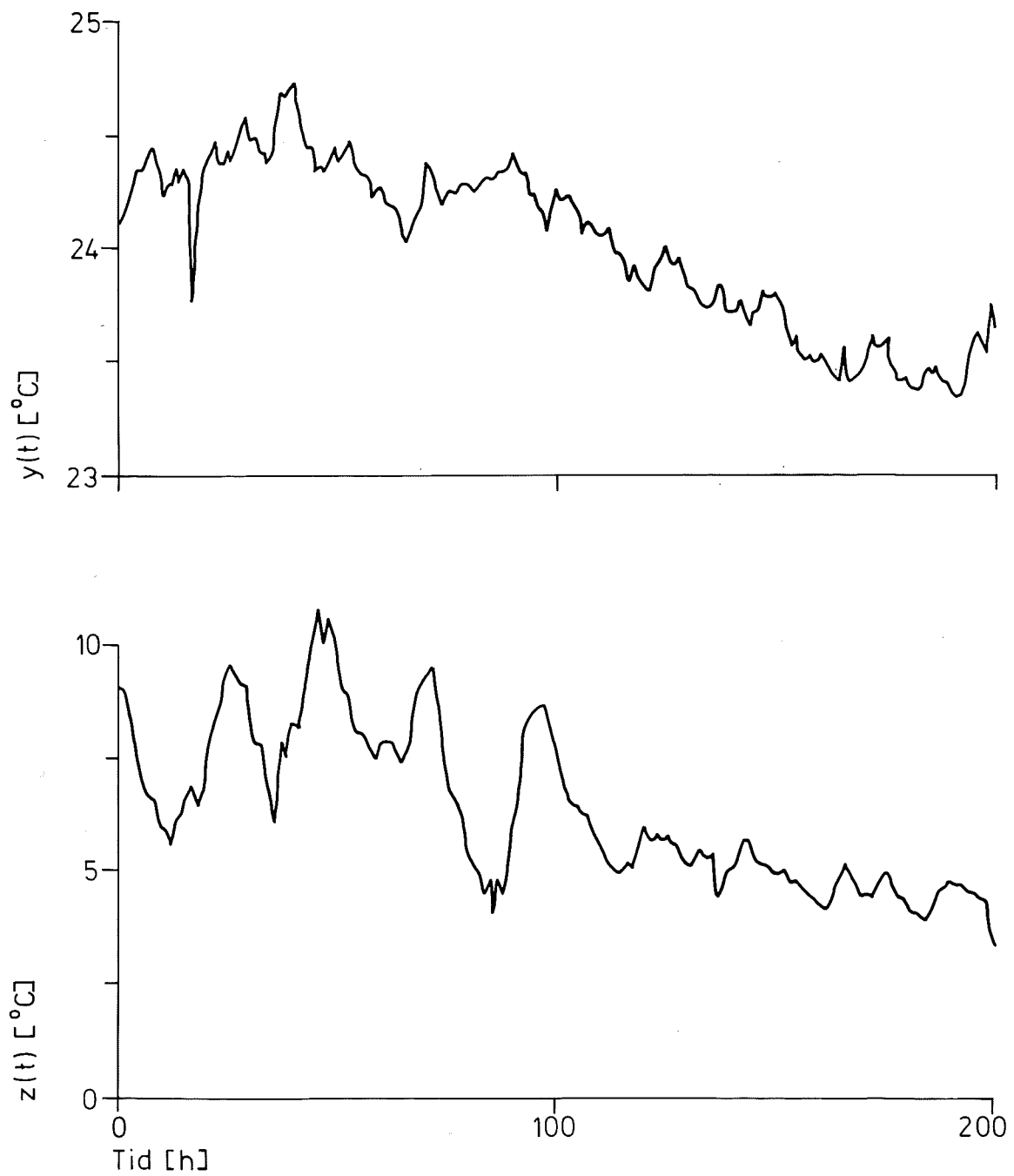


FIG 7.8 - Resultat från experiment med normal reglering med start 1976-12-15. Kurvorna är medelluftstemperatur  $y(t)$  i  $^{\circ}\text{C}$  och utetemperatur  $z(t)$  i  $^{\circ}\text{C}$ . Samplingsintervallet är 1 timme.

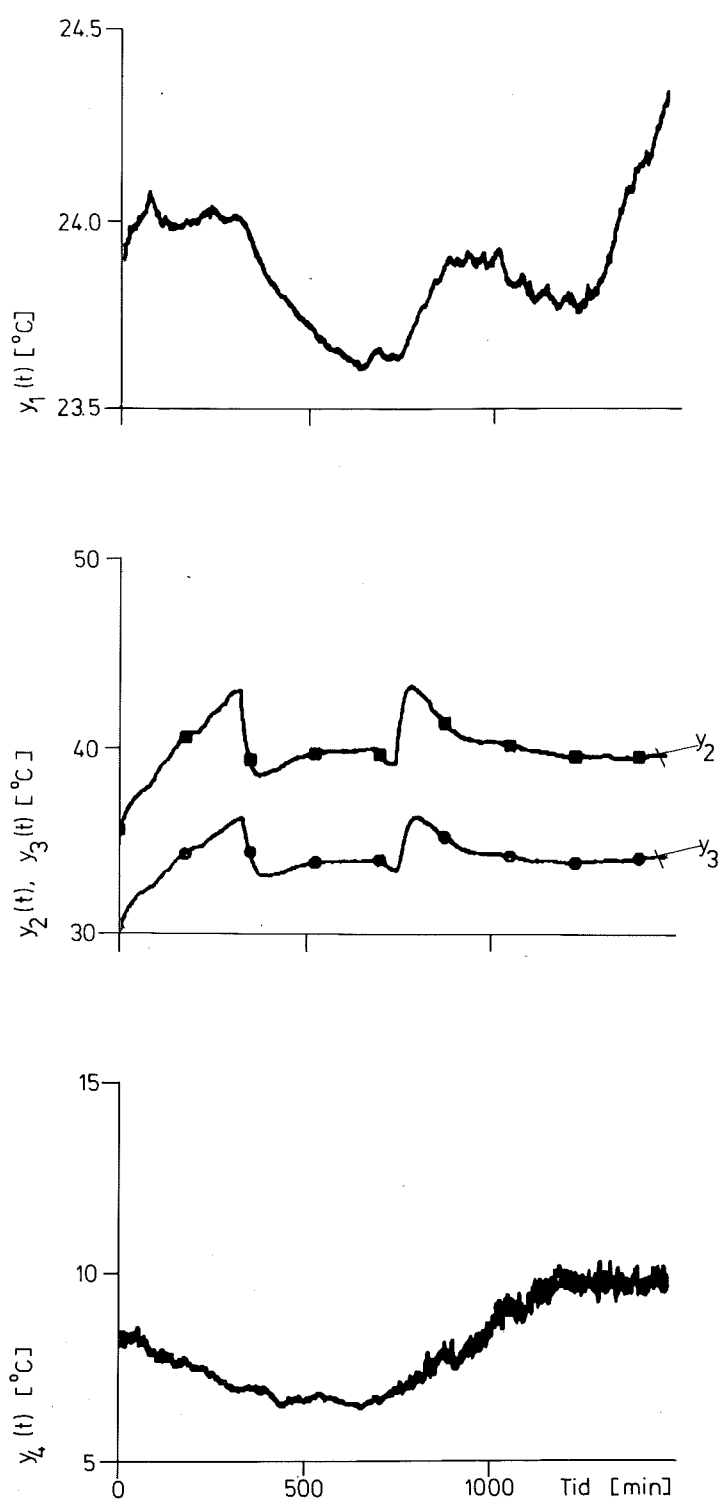


FIG 7.9 - Resultat från experiment med normal reglering med start 1977-05-14 kl 18.00. Kurvorna är uppifrån: medelfrånluftstemperatur  $y_1(t)$ , radiatorutloppstemperatur  $y_2(t)$ , radiatorreturtemperatur  $y_3(t)$ , och utetemperatur  $y_4(t)$ . Nattsänkning på omkring  $5^{\circ}\text{C}$  mellan kl 23.00 och kl 06.00.

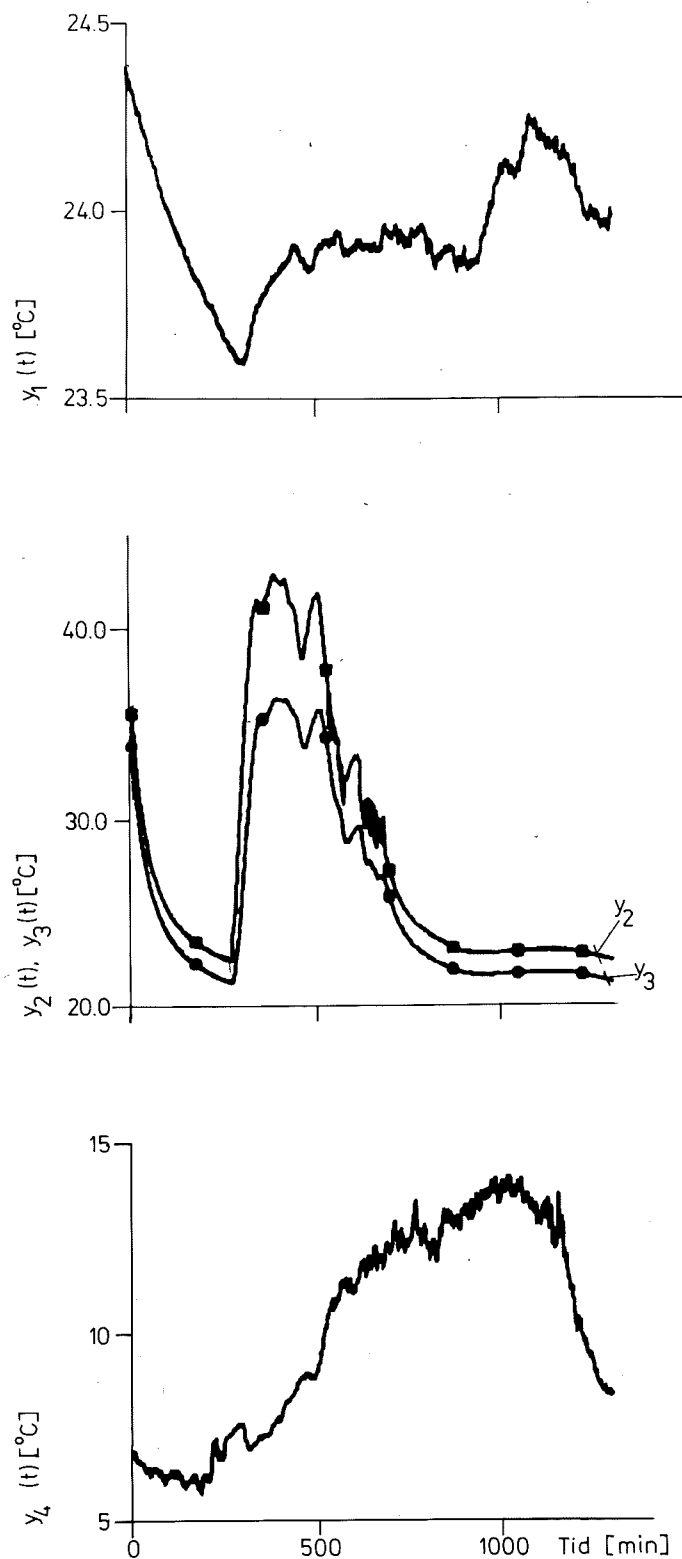


FIG 7.10 - Resultat av datorreglering med fram- och återkoppling med start 1977-05-07 kl 22.30. Kurvorna är uppifrån: medelfrånluftstemperatur  $y_1(t)$ , radiatorutloppstemperatur  $y_2(t)$ , radiatorreturtemperatur  $y_3(t)$  och utetemperatur  $y_4(t)$ . Börsvärdet för frånluftstemperaturen är 23.9°C.

### 3. LUFTVÄRMDA RUM

I detta avsnitt ges exempel på temperaturreglering av ventilerade rum. Tre rum har undersökts: ett försöksrum, en lektionssal och ett sjukhusrum. Experimenten finns utförligt dokumenterade i Jensen (1976), Ekström m fl (1974 a,b) samt Jensen och Hänsel (1974e).

#### Försöksrum

Avsikten med detta underavsnitt är lika mycket att ge exempel på konvektiv uppvärmning som att ge exempel på olika typer av till-från reglering.

#### Modeller

Sammarum som beskrivits i avsnitt 2 i kapitel 7 har använts. I detta fall värmdes rummet genom varmluftsinsblåsning. Luftvärmarens effekt var 4 kW och antalet luftväxlingar var tolv per timme.

Reglerobjektet kan delas upp i tre delprocesser nämligen luftvärmaren, luftkanalen och rummet. I kapitel 4 härledes en fysikalisk modell för ett ventilerat rum. Enligt (5.2) kan rummets dynamiska egenskaper beskrivas med överföringsfunktionen (tidsenhet 1 min)

$$G_R(s) = \frac{0.35}{(2.6 s + 1)}$$

där tidskonstanten för försöksrummet FR1 tagits från tabell 5.2. Förstärkningen har beräknats enligt den experimentellt funna formeln.

Luftkanalen har följande data:

längd	6 m
diameter	0.2 m
tjocklek	0.001 m
flöde	600 m <sup>3</sup> /h

I avsnitt 2 i kapitel 5 har överföringsfunktionen för en luftkanal härletts. Det följer av ekvationen (5.8) att luftkanalens dynamiska egenskaper kan beskrivas med överföringsfunktionen

$$G_K(s) = 0.50 + \frac{0.50}{1.7 s + 1}$$

Enligt ekvation (5.8) finns också en ren tidsfördröjning. I detta fall blir den så liten (1 s) att den helt kan försummas.

Elbatteriets förstärkning bestämdes experimentellt till 5°C/kW. Någon bestämning av elementets tidskonstant gjordes ej. Ett liknande element har emellertid undersökts i Jensen (1974c). Där befanns tidskonstanten vara 3 min. Elvärmarens dynamiska egenskaper kan således approximativt beskrivas med överföringsfunktionen

$$G_E(s) = \frac{5}{3 s + 1}$$

Den totala processdynamiken kan då uppskattas som

$$G_T(s) = G_E(s) G_K(s) G_R(s) = \frac{1.75}{(2.6 s + 1)(3 s + 1)} \left[ 0.5 + \frac{0.5}{(1.7 s + 1)} \right]$$

Detta kan jämföras med en identifierad samplad modell med samplingsintervallet 1 minut

$$y(t+1) = 0.915 y(t) + 0.115 u(t-3) \quad (7.6)$$

Modellens förstärkning är 1.35 °C/kW och motsvarande tidskonstant är 11 min.

### Reglering

Den första regulatorn är en ren till-från regulator. I avsnitt 2 i kapitel 6 har olika förbättringar av ren till-från reglering diskuterats. En liten men ej betydande förbättring fås genom införande av derivatan i regulatorn. I detta fall är regulatorn

$$u(t) = \begin{cases} 4 \text{ kW} & y(t) + 0.9[y(t) - y(t-1)] < y_r \\ 0 \text{ kW} & y(t) + 0.9[y(t) - y(t-1)] > y_r \end{cases} \quad (7.7)$$

Enligt ekvation (7.6) har processen en tidsfördröjning på 3 min. Derivatans förstärkning får då högst vara  $0.5 \cdot 3 = 1.5$ . Värdet 0.9 som använts i (7.7) ger alltså en viss marginal.

En betydligt bättre till-från reglering kan erhållas genom att utnyttja den matematiska modellen (7.6) för processen. Enkla räkningar visar att dead-beat

strategin för modellen (7.6) är

$$u_{db}(t) = -6.10 y(t) - 0.915 u(t-1) - 0.837 u(t-2) - 0.766 u(t-3) \quad (7.8)$$

En alternativ till-från regulator är då

$$u(t) = \begin{cases} 4 \text{ kW} & \text{om } u_{db}(t) > 2 \\ 0 \text{ kW} & \text{om } u_{db}(t) < 2 \end{cases}$$

I denna regulator finns ingen integrator och det har ej tagits hänsyn till att belastningen kan variera. Detta medför att utsignalens medelvärde kan vara skilt från noll. Genom att införa en integrator i modellen kan regulatorn modifieras så att medelfelet blir noll. Dead-beat regulatorn blir i detta fall:

$$u_{db}(t) = -28.0 y(t) - 8.70 \tilde{y}(t) - 1.915 u(t-1) - 2.752 u(t-2) - 3.518 u(t-3) \quad (7.9)$$

och till-från regulatorn fås på samma sätt som tidigare.  $\tilde{y}(t)$  ovan är integralen av utsignalen  $y(t)$ .

### Experiment

Vid experimenten har de olika regulatorerna provats på ett experimentrum. Varje reglerförsök med en regulator omfattade två timmar och efter en timme ändrades börvärdet från 20°C till 21°C. Samplingsintervallet var 1 min. Resultaten från experimenten visas i FIG 7.11 - 7.14.

Experimenten med ren till-från reglering med och utan derivering visar att amplituden på svängningarna minskar med deriveringen. En annan observation är att medelfelet varierar med börvärdet eller lasten. Resultaten från de två till-från regulatorerna baserade på dead-beat strategier med och utan extra integrator uppvisar inget medelfel resp ett visst medelfel. Kurvorna visar också att ren till-från reglering kan förbättras avsevärt med regulatorer som är baserade på en modell för processen.

Ett annat alternativ är att pulslängdsmodulera insignalen, varvid även andra typer av styrlagar kan användas. Antalet till- och frånslag blir då 240 under 120 minuter vid en periodlängd om en minut. Detta kan jämföras med antalet till- och frånslag för ren till-från reglering resp till-från reglering enligt (7.9), som har varit 21 resp 41 under motsvarande tid.

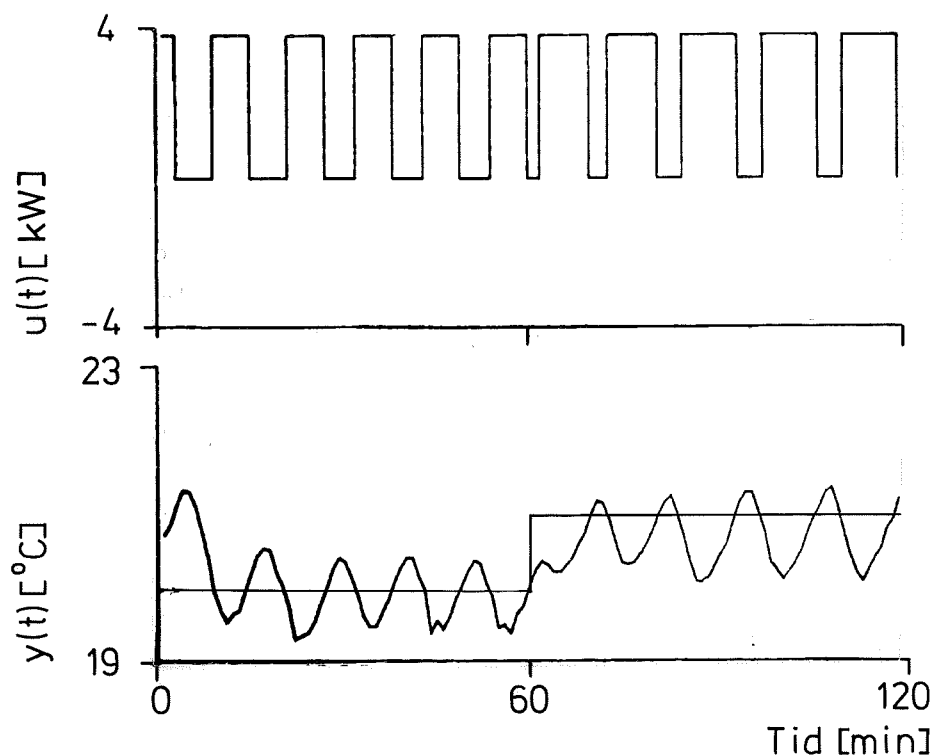


FIG 7.11 - Experiment med konvektiv uppvärmning. Digital till-från regulator.  $u(t)$  är effekt i kW.  $y(t)$  är rumslufttemperatur i  $^{\circ}\text{C}$ . Börvärdet är  $20^{\circ}\text{C}$  under den första timmen och  $21^{\circ}\text{C}$  under den andra.

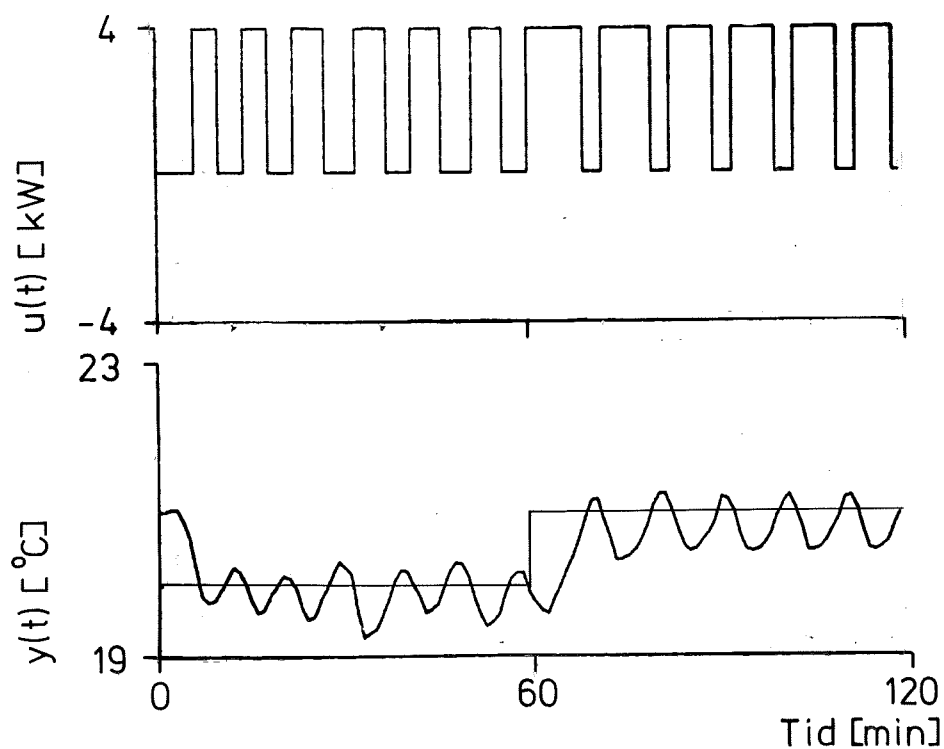


FIG 7.12 - Experiment med konvektiv uppvärmning. Digital till-från regulator med derivering (7.7).  $u(t)$  är effekt i kW.  $y(t)$  är rumslufttemperatur i  $^{\circ}\text{C}$ . Börvärdet är  $20^{\circ}\text{C}$  under den första timmen och  $21^{\circ}\text{C}$  under den andra.



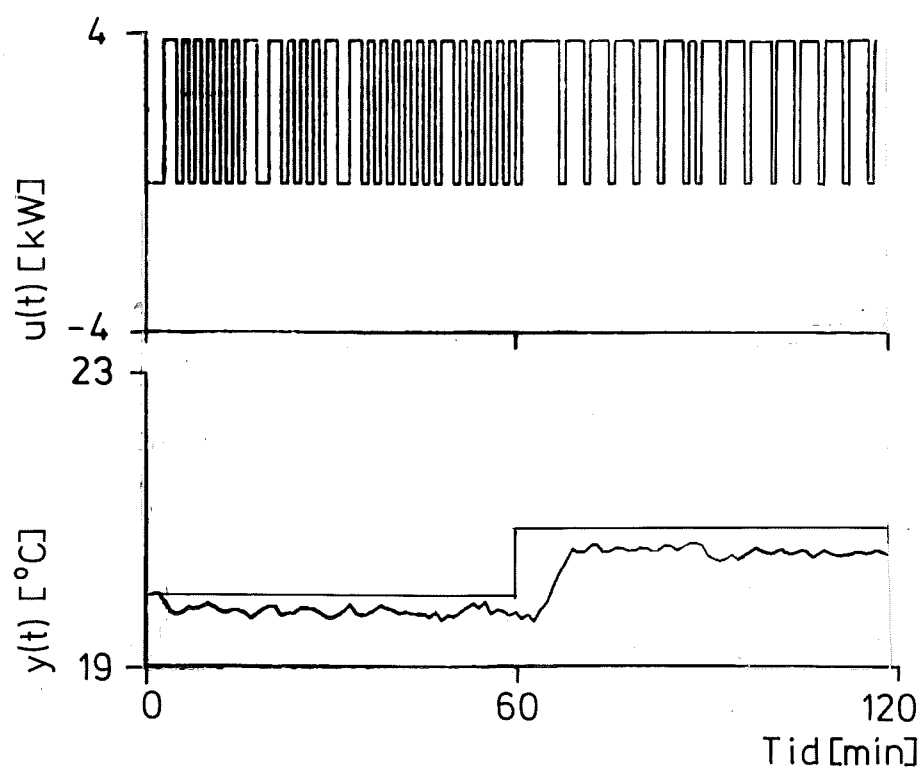


FIG 7.13 - Experiment med konvektiv uppvärmning. Digital till-från regulator enligt (7.8).  $u(t)$  är effekt i kW.  $y(t)$  är rumslufttemperatur i °C. Börvärdet är 20°C under den första timmen och 21°C under den andra.

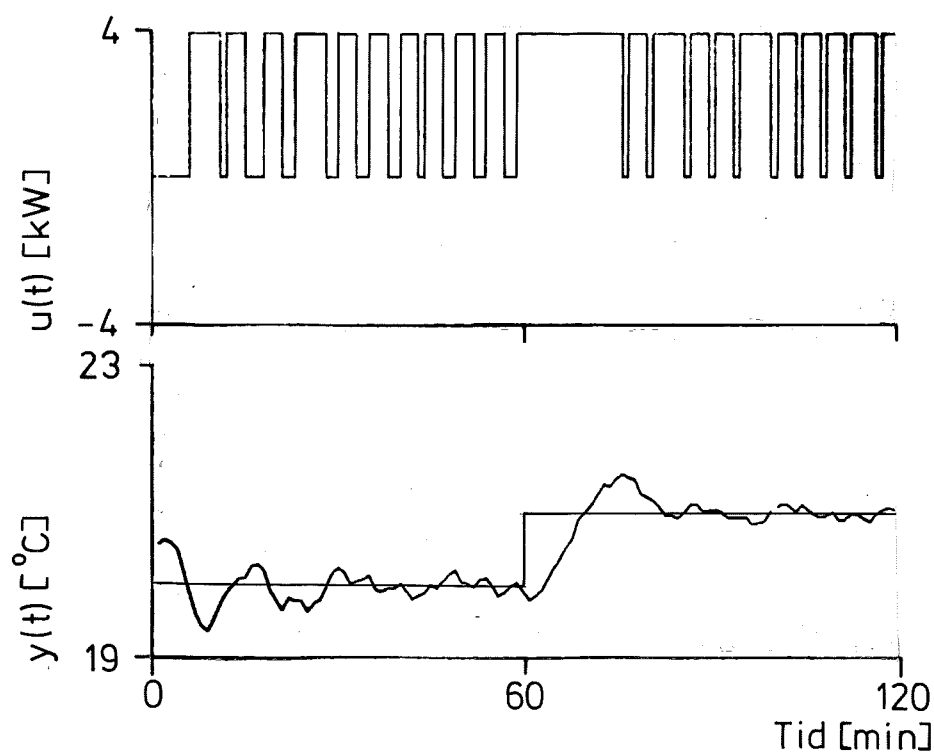


FIG 7.14 - Experiment med konvektiv uppvärmning. Digital till-från regulator enligt (7.9).  $u(t)$  är effekt i kW.  $y(t)$  är rumslufttemperatur i °C. Börvärdet är 20°C under den första timmen och 21°C under den andra.

### Lektionssal

Avsikten med detta experiment var att jämföra konventionell och digital reglering av lufttemperaturen i en lektionssal. Arbetet utfördes i samarbete med Ångpanneföreningen i Malmö. Det finns utförligt dokumenterat i Ekström m fl (1974 a,b).

Den lokal som studerats är en lektionssal för 40 personer i Ångpanneföreningens nya kontorshus i Malmö. Lektionssalen har följande data:

längd	11 m
bredd	7.5 m
höjd	3.2 m
golv, tak	betong
mellanväggar	gipsskivor, regler
fönsteryta	11 m <sup>2</sup>
antal luftväxlingar	10.8/h

Lektionssalen värmdes dels med ventilationssystemet och dels med konvektorer som var placerade längs fönsterväggen. Rummet var möblerat som vanligt.

Insignalen till processen var en börvärdessignal till ett lägesservo för vattenventilen som förser blandningskretsen med varmvatten. I blandningskretsen ingår en pump och ett varmluftbatteri. Uteluften passerar i tur och ordning uteluftspjäll, filter, varmluftbatteri, fläkt, tilluftskanal och blåses in i rummet i fem tvärsektioner. Evakueringen sker genom belysningsarmaturen i de fyra mellanliggande tvärsektionerna. För att undvika kondens i tilluftskanalen och kallras i rummet finns det en minibegränsningsgivare i tilluftskanalen.

Rumslufttemperaturen uppmättes vid den ordinarie temperaturgivaren i dess särskilda frånluftskanal, som inte avsög någon belysningsarmatur. Belysningsvärmets höjer annars frånluftstemperaturen över lokaltemperaturen.

En enkel modell har beräknats för processen lägessignal till frånluftstemperatur. Överföringsfunktionen för de tre delprocesserna värmebatteri,  $G_V(s)$ , luftkanal,  $G_K(s)$ , och rum,  $G_R(s)$ , är följande:

$$G_V(s) = \frac{2.6}{(s+1)} \quad G_K(s) = 0.58 + \frac{0.42}{(2s+1)} \quad G_R(s) = \frac{0.4}{(3s+1)}$$

Den identifierade modellen är följande

$$y(t+1) - 0,9455 y(t) + 0,0375 y(t-1) = 0,0318 u(t-3) + 0,0309 u(t-4) \quad (7.10)$$

Den beräknade förstärkningen blir 1.04 °C/V. Detta skall jämföras med den identifierade modellens förstärkning på 0.87 °C/V. För den aktuella luftkanalen uppmättes förluster till omkring 15 %, vilket ger en total förstärkning på 0.88 °C/V. Överensstämmelsen mellan den dominerande tidskonstanten för den identifierade modellen och den enkla teoretiska modellen är däremot klart sämre. Värdena är 10 min resp 6.3 min. Den identifierade modellens tidsfördröjning är klart större än de transportfördröjningar som finns i processen.

### Reglering

Den konventionella regulatorn, Mikronik 75 (Honeywell) försedd med modulerna T 04 och M 01 kördes med ett P-band på 4°C och en integrationstid på 15 minuter. Detta motsvarar en P-förstärkning på 4.5 V/°C och en I-förstärkning på 0.3 V/°C, min. Den motsvarande digitala regulatorn kan alltså skrivas som

$$u(t) = - 4.5 y(t) - 0.3 \tilde{y}(t)$$

Den ena digitala regulatorn var en PI-regulator, som hade bestämts genom simulering av den tidigare givna modellen (7.10) till följande:

$$u(t) = - 2 y(t) - 0.25 \tilde{y}(t) \quad (7.11)$$

Den andra digitala regulatorn hade bestäms med hjälp av linjärkvadratisk reglerteori till följande:

$$u(t) = - 10.99 y(t) + 1.33 y(t-1) - 1.61 \tilde{y}(t) + 0.42 u(t-1) + 0.48 u(t-2) + 0.53 u(t-3) + 0.30 u(t-4) \quad (7.12)$$

### Experiment

Varje försök med en regulator omfattade 150 minuter. Varmvindsfläktar var

påslagna mellan den 20:e till den 25:e minuten och mellan den 70:e och 110:e minuten. En försöksserie omfattade ett försök utan reglering, ett försök med en konventionell analog PI-regulator och två försök med digitala regulatorer. Tre försöksserier utfördes med olika störnings-effekt, nämligen 1 kW, 2 kW och 4 kW. Anläggningen är dimensionerad att klara av en värmelast på 6 kW. Resultatet från försöksserien med stör-effekten 2 kW återges i FIG 7.15 - 18.

Då ventilservot hade en dödzon på  $\pm 0.2$  volt, ställdes ej lägesändringar mindre än  $\pm 0.25$  volt ut. Detta framgår tydligt om insignalen undersöks närmare. Som insignal återges lägessignalen, när den konventionella regulatorn användes. Börvärdet har varit  $22.5^{\circ}\text{C}$ . Före försöken har den konventionella regulatorn varit inkopplad. Utvärdering av försöken har skett genom att beräkna olika statistiska data för utsignalen och från-lufttemperaturen  $y(t)$ . De beräknade värdena återges i tabell 7.2.

Det framgår av tabell 7.2 och FIG 7.15 - 18 att den linjärkvadratiske regulatorn är bäst. Vidare att den analoga och digitala regulatorn är jämgoda. En annan observation är att ju bättre reglering som krävs desto mer och oftare måste insignalen ändras.

Dessutom krävs det ett större antal regulatorparametrar, vilket kan vara arbetskrävande att bestämma och platskrävande i en dator. En god kompromiss torde då vara att en PI-regulator är lämplig att använda.

Tabell 7.2 - Medelvärde (med), rotmedelkvadratvärde (rms), minimivärde (min) och maximivärde (max) för rumslufttemperaturens avvikelse i °C för olika delar av ett experiment och för olika regulatorer. Störningseffekten har varit 2 kW.

A ingen reglering

B analog PI-regulator

C digital PI-regulator

D linjärvadratisk regulator

1 tidsperiod från 21 min till 70 min

2 tidsperiod från 71 min till 150 min

Experiment	FIG	Tidsperiod	med	rms	min	max
A	7.15	1	-0.09	0.14	-0.21	0.25
A	7.15	2	0.29	0.39	-0.18	0.82
B	7.16	1	0.06	0.19	-0.30	0.52
B	7.16	2	-0.06	0.25	-0.63	0.59
C	7.17	1	0.03	0.12	-0.23	0.33
C	7.17	2	0.02	0.25	-0.53	0.53
D	7.18	1	0.04	0.13	-0.30	0.40
D	7.18	2	0.00	0.15	-0.48	0.41

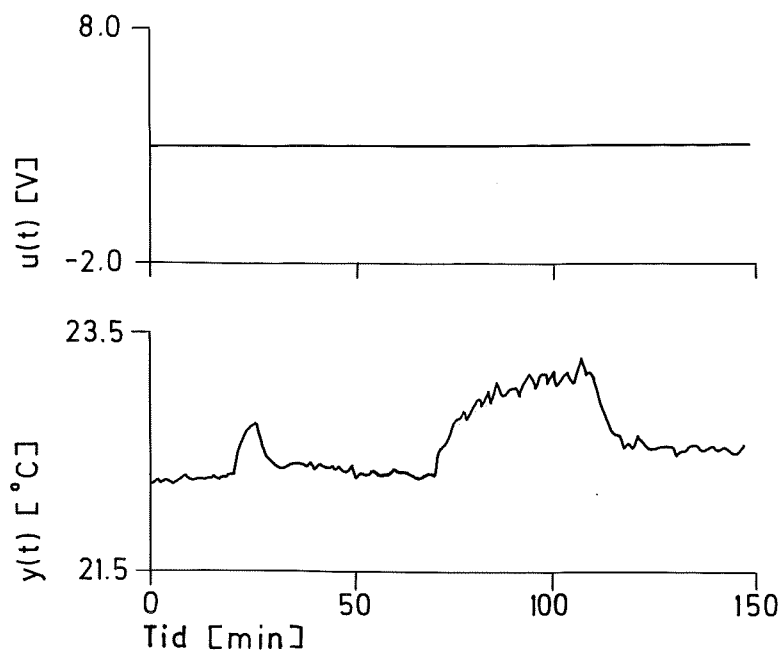


FIG 7.15 - Experiment med en lektionssal och ingen reglering.  $u(t)$  är ventilläget.  $y(t)$  är frånluftstemperaturen i °C.

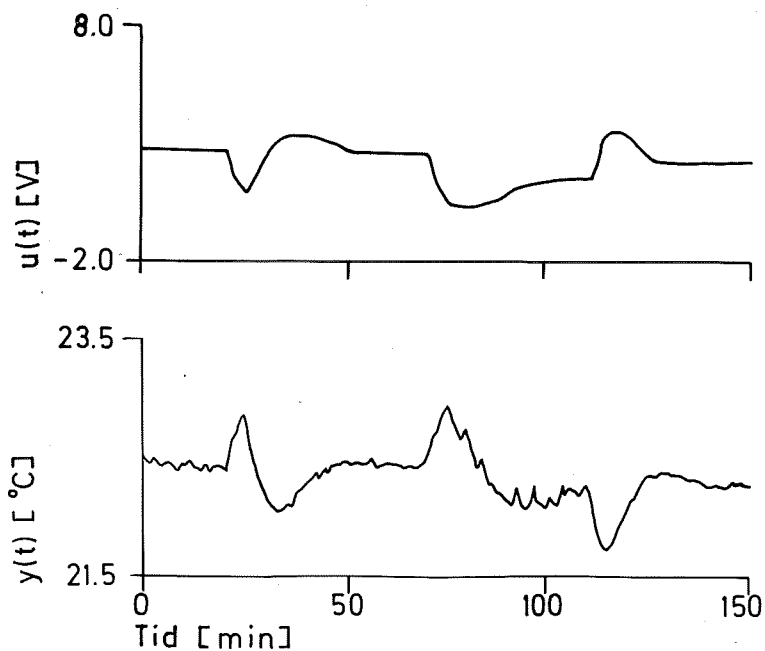


FIG 7.16 - Experiment med en lektionssal och en analog PI-regulator.  $u(t)$  är ventilläget.  $y(t)$  är frånluftstemperaturen i °C.

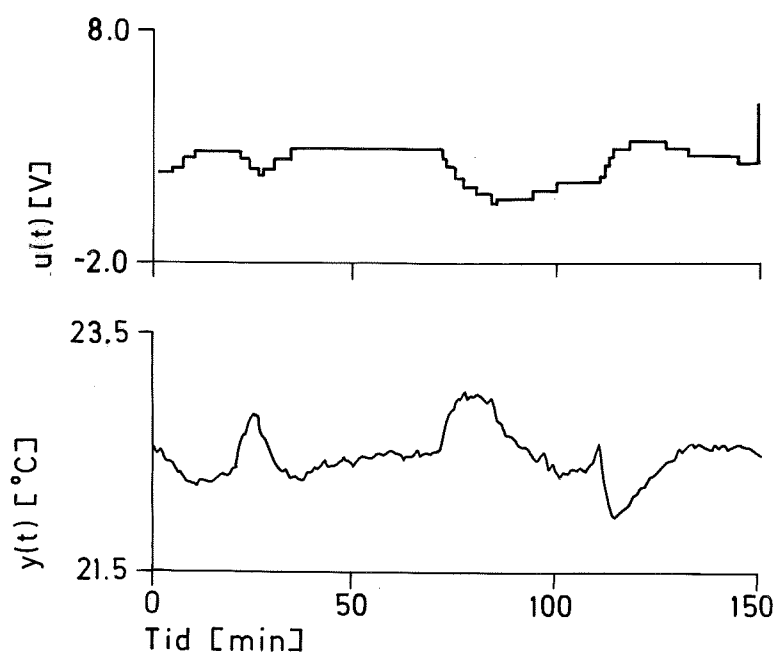


FIG 7.17 - Experiment med en lektionssal och en digital PI-regulator (7.11).  $u(t)$  är ventilläget.  $y(t)$  är frånluftstemperaturen i °C.

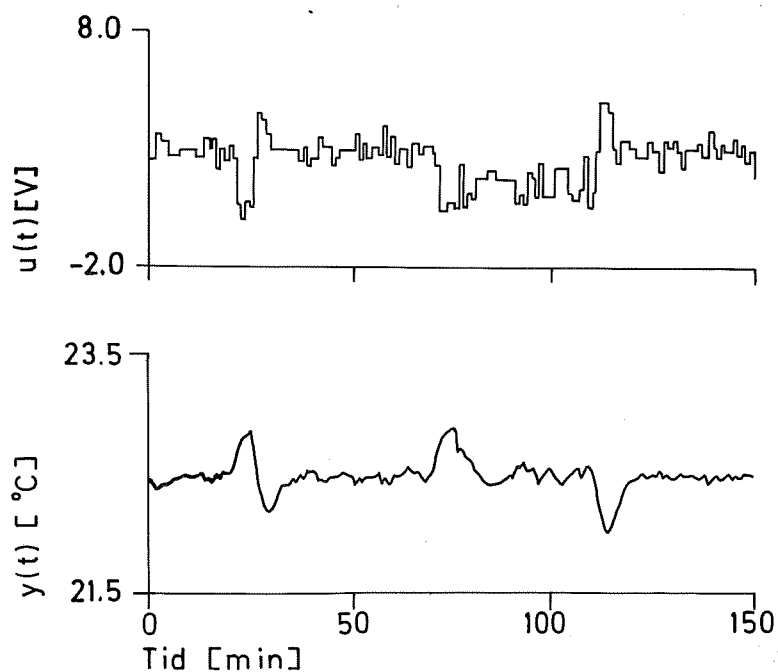


FIG 7.18 - Experiment med en lektionssal och en linjärvadratisk regulator (7.12).  $u(t)$  är ventilläget.  $y(t)$  är frånluftstemperaturen i °C.

## Sjukhusrum

Avsikten med detta arbete var att jämföra en eftervärmare reglerad med spjäll med reglering av vattenflödet genom batteriet med hjälp av en magnetventil. Detta arbete har skett i samarbete med Angpanneföreningen i Malmö och Malmö Allmänna Sjukhus. Arbetet finns utförligt beskrivet i Jensen och Hänse (1974e).

## Rummet

Rummet är en enpatientrum i en långvårdsklinik vid Malmö Östra Sjukhus. Några data är

längd	4.6 m
bredd	3.0 m
höjd	2.6 m
antal luftväxlingar	7.4/h
tilluft utan värme	13 °C
tilluft efter maximal värme	25 °C

Rummet var omöblerat. Vid fönstret fanns en radiator som var avstängd.

## Eftervärmaren

Alla rum försågs med tilluft med en temperatur på omkring 15 °C. Till varje rum fanns en eftervärmare och ett pneumatiskt reglersystem med rumsgivare. Regleringen tillgick så att två spjäll kunde leda tilluften genom eller förbi själva varmlufts-batteriet. Vattnet strömmade ständigt genom batteriet. Det visade sig att trots att spjällen var helt stängda för batteriet erhöles en viss temperaturhöjning av tilluften som berodde på aktuellt och dimensionerat luftflöde och temperaturdifferens mellan vatten och luft i eftervärmaren. Denna temperaturhöjning är olämplig sommartid, då den få kylas bort. I det aktuella fallet uppmättes en temperaturökning på 1.5 °C.

## Nytt reglersätt

Ett sätt att minska den onödiga temperaturhöjningen är att i stället reglera på varmvattenflödet. Detta är knappast möjligt att göra med en vanlig reglerventil, då det knappast finns så små reglerventiler och att risken för läckage omöjliggör montage i undertak. Ett kontinuerlig flöde kan approximeras med att pulslängdsmodulera vattenflödet med hjälp av en magnetventil.



En P-, en PI- och en PID-regulator har simulerats fram med modellen (7.13):

$$y(t) - 1.053 y(t-1) + 0.152 y(t-2) = 0.245 u(t-4) + 0.048 u(t-5) \quad (7.13)$$

Modellens förstärkning är omkring  $3^{\circ}\text{C}$  och dess dominerade tidskonstant är 10 minuter.

P-regulatorn är

$$u(t) = - 0.4 y(t). \quad (7.14)$$

PI-regulatorn är

$$u(t) = - 0.4 y(t) - 0.05 \tilde{y}(t). \quad (7.15)$$

PID-regulatorn är

$$u(t) = - y(t) + 0.5 y(t-1) - 0.06 \tilde{y}(t). \quad (7.16)$$

Regulatorutsignalen  $u(t)$  ligger i  $(0, 1)$  och anger pulslängden relativt periodlängden. Periodlängden sattes till en minut.

Rummets dynamik kan uppskattas enligt förfarandet i kapitel 5 avsnitt 1. Förstärkning och tidskonstant blir då 0.24 resp 4 min. Några data för luftkanalen är

längd	4 m
diameter	0.1 m
tjocklek	0.001 m
flöde	170 m <sup>3</sup> /h

En enkel första ordningens modell fås enligt avsnittet 2 i kapitel 5 som

$$G(s) = 0.5 + \frac{0.5}{(2s + 1)}$$

Värmaren borde egentligen beskrivas med en olinjär modell eller två linjära modeller. Den ena beskriver när flödet är maximalt och den andra när flödet är noll. Värmaren är identisk med den som beskrivs i kapitel 5 avsnitt 3. Värmarens tidskonstant har beräknats till 0.5 min och 3 min för maximalt resp inget flöde. Den totala förstärkningen mellan vattentemperatur in och

lufttemperatur ut är omkring 0.25. Med en vattentemperatur på 45 °C och en lufttemperatur in på 13 °C blir luftvärmarens förstärkning vid maximalt flöde 8 °C (0.25(45-13)).

Överföringsfunktionen från vattenflöde till rumslufttemperatur kan då approximeras med

$$G(s) = \frac{8}{(s+1)} \frac{(s+1)}{(2s+1)} \frac{0.24}{(4s+1)} \approx \frac{2}{(2s+1)(4s+1)}$$

Den totala förstärkningen blir då 2°C och den dominerande tidkonstanten blir 6 minuter.

Den experimentellt bestämda förstärkningen är större, vilket beror på att den är ett mellanting mellan den lokala och den totala förstärkningen. De dominerande tidkonstanterna skiljer sig också åt och den experimentella modellens tidsfördröjning kan inte beskrivas med försummade transportfördröjningen.

### Experiment

För att jämföra olika försök, som varade i 100 minuter, var 4 st 100 W glödlampor tända under den 30:e till den 60:e minuten. Denna effekt skall jämföras med tilluftens teoretiska kyleffekt på 57 W/°C undertempererad tilluft.

Den egna rumslufttemperaturgivaren placerades intill den installerade pneumatiska givaren.

Spjällens läge har ej uppmätts. Vid reglering med magnetventil har spjällen varit helt öppna. Detta åstadkoms genom att en magnetventil för luft kopplar bort den pneumatiska regulatorn och matar eftervärmarens manövercylinder direkt, varvid spjällen öppnas maximalt.

I FIG 7.19 - 24 återges experiment med ingen reglering, normal reglering, till-från reglering och pulslängdsmodulering enligt P-, PI- och PID-regulator. Börvärdet har varit 22 °C för till-från regulatorn och P-regulatorn samt 22.5 °C för PI- och PID-regulatorn. Samplingsintervallet har varit 1 minut.

Det var ej möjligt att koppla bort den normala regleringen så att ingen reglering erhöles med bibehållande av samma spjällinställning, då ett mindre läckage i manövercylindern eller i anslutning till denna skulle leda till att spjällen skulle stänga helt. I stället reglerades magnetventilen med en konstant, men något för stor pulslängdsmodulerad insignal. Detta ledde till ett stegsvar i rumslufttemperatur och överlagrade på detta stegsvar störningen från de fyra 100 W glödlamporna.

Experimentet med den normala regleringen visar att störningen är i stort sett lika stor som utan någon reglering. Detta kan bero på hysteres i det pneumatiska reglersystemet.

Den digitala till-från regulatorn i FIG 7.21 visar att medeltemperaturen ökar med minskande värmebehov.

Den digitala P-regulatorn har ett p-band på  $2.5^{\circ}\text{C}$ , vilket är större än den pneumatiska, men det stationära felet är mindre i detta fall. En förklaring är att processförstärkningen varierar med flödet och är störst för små flöden. Det framgår av FIG 7.22 att flödet har varit lågt. Om blandning sker linjärt är förstärkningen konstant för fallet med spjällreglering. Den förstärkningen är i detta fall lika med den totala för fallet med flödesreglering. Redan vid ett flöde som är 20 % av det maximala ger värmaren 60 % av sin kapacitet. Detta innebär att vid insignalintervallet 0 - 0.2 är förstärkningen 3 gånger den totala. Detta framgår också av identifieringsresultaten i kapitel 5 avsnitt 3.

Experimenten med PI- och PID-regulatorerna i FIG 7.23 - 24 innehåller en del spikar, vilket är mätstörningar. I regulatorpaketet testas ändringen hos insignalen och vid stora avvikelser används det gamla värdet. En viss hängningsrisk finns i samband med uppstart av en regulator. Det gamla värdet stämmer ej med aktuellt driftstillstånd.

### Slutsatser

Resultaten av reglerförsöken med patientrummet kan sammanfattas med följande slutsatser.

Magnetventilen kan användas vid reglering av eftervärmare.

Ren till-från reglering är möjlig att använda om en avvikelse på  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  kan accepteras. Det bör observeras att den aktuella

digitala till-från regulatorn ej har någon hysteres. Vid implementering av en elektromekanisk eller elektronisk regulator bör detta observeras. Hysteresen kan för dessa två uppgå till  $1^{\circ}\text{C}$  respektive  $0.2^{\circ}\text{C}$ .

En digital PI-regulator kan hålla temperaturavvikelserna inom  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$  vid måttliga störningar och inom  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  utan några störningar.

Det finns ljudproblem som måste lösas. Mitt i rummet uppmättes 40 dB när dörren var stängd till förrummet i vars undertak eftervärmaren och magnetventilen fanns.

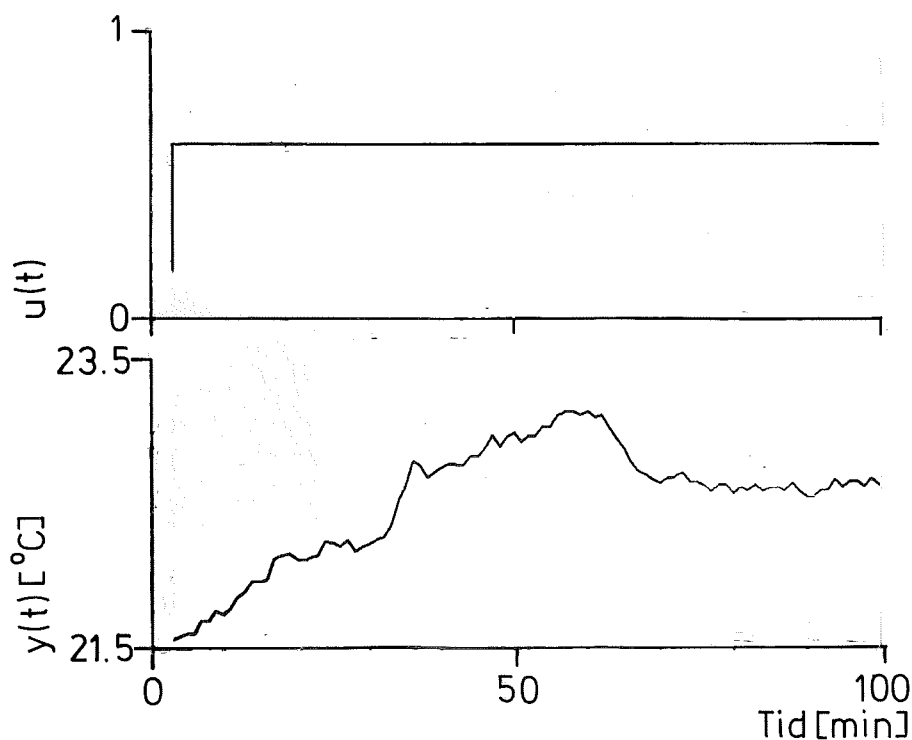


FIG 7.19 - Experiment med ett patientrum och ingen reglering.  $u(t)$  är pulslängdsförhållande.  $y(t)$  är lokaltemperatur i  $^{\circ}\text{C}$ .

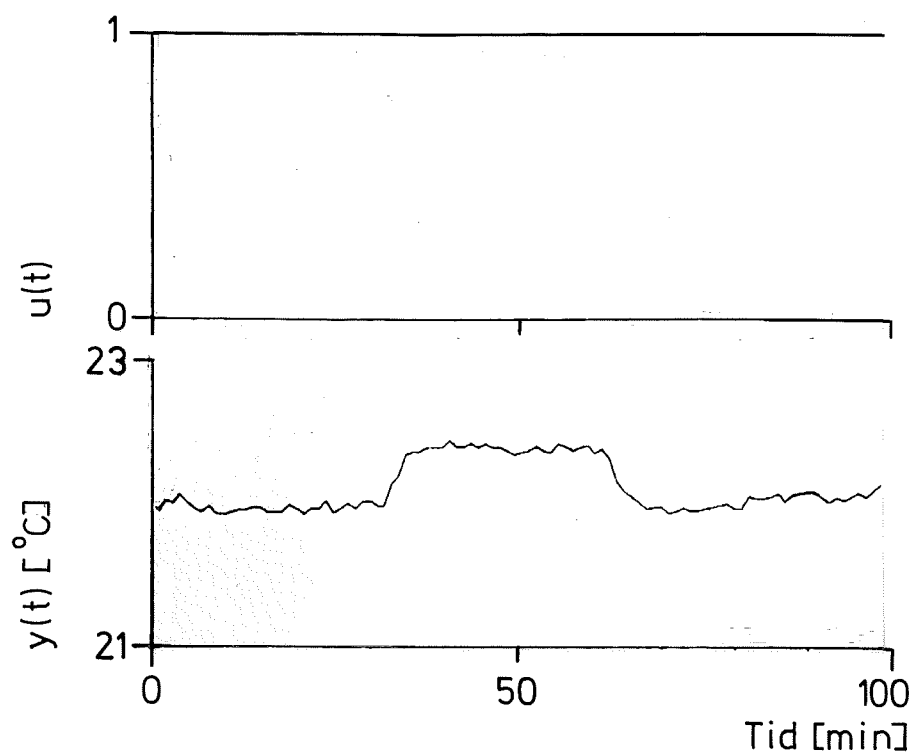


FIG 7.20 - Experiment med ett patientrum och normal spjällreglering. Magnetventilen är helt öppen.  $u(t)$  är pulslängdsförhållande.  $y(t)$  är lokaltemperatur i  $^{\circ}\text{C}$ . Börvärdet är  $22^{\circ}\text{C}$ .

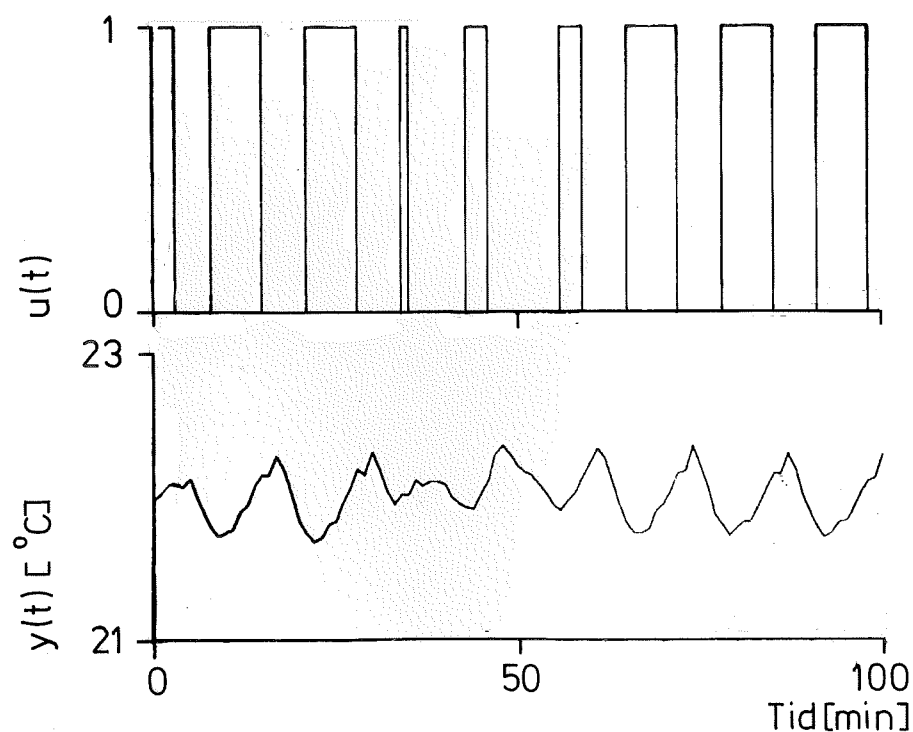


FIG 7.21 - Experiment med ett patientrum och en digital till-från reglering.  $u(t)$  är pulslängdsförhållande.  $y(t)$  är lokaltemperatur i  $^{\circ}\text{C}$ . Börvärdet är  $22^{\circ}\text{C}$ .

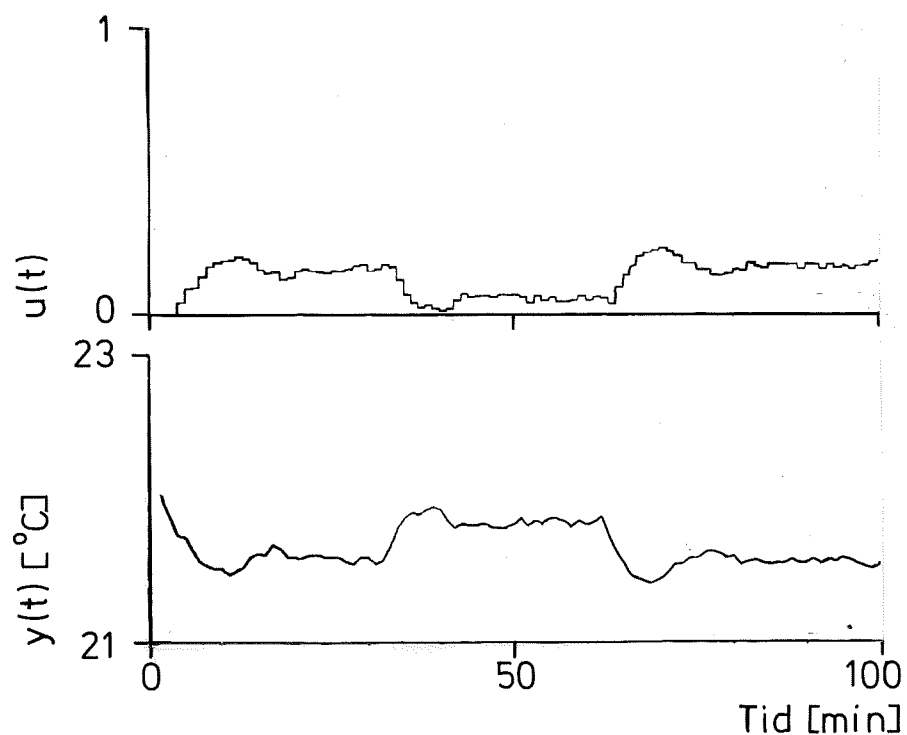


FIG 7.22 - Experiment med ett patientrum och en digital P-regulator.  $u(t)$  är pulslängdsförhållande.  $y(t)$  är lokaltemperatur i  $^{\circ}\text{C}$ . Börvärdet är 22  $^{\circ}\text{C}$ .

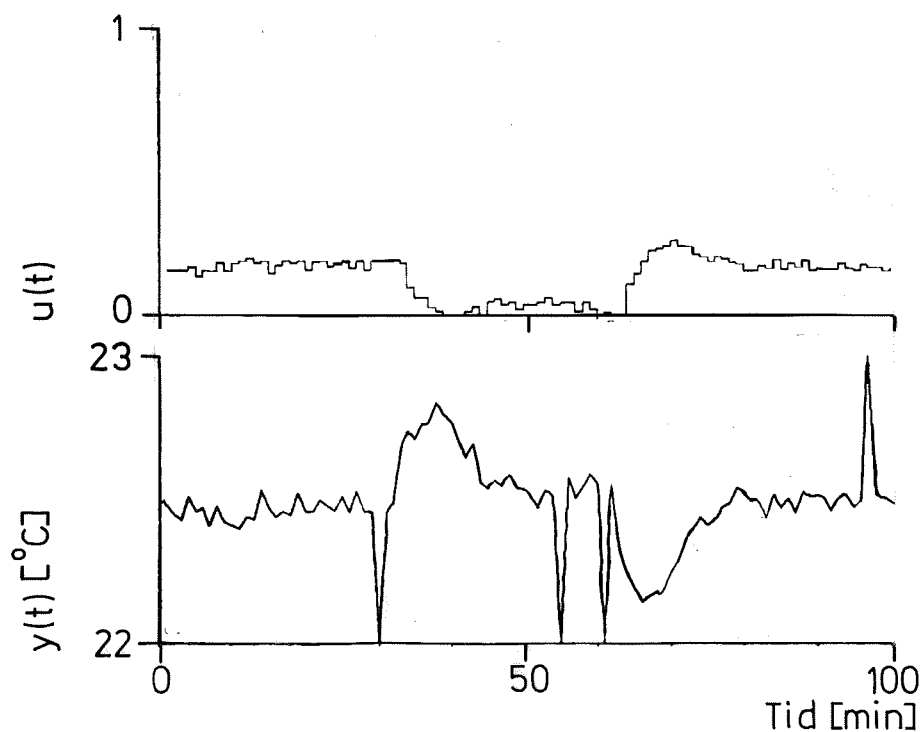


FIG 7.23 - Experiment med ett patientrum och en digital PI-regulator (7.15).  $u(t)$  är pulslängdsförhållande.  $y(t)$  är lokaltemperatur i  $^{\circ}\text{C}$ . Börvärdet är 22.5  $^{\circ}\text{C}$ .

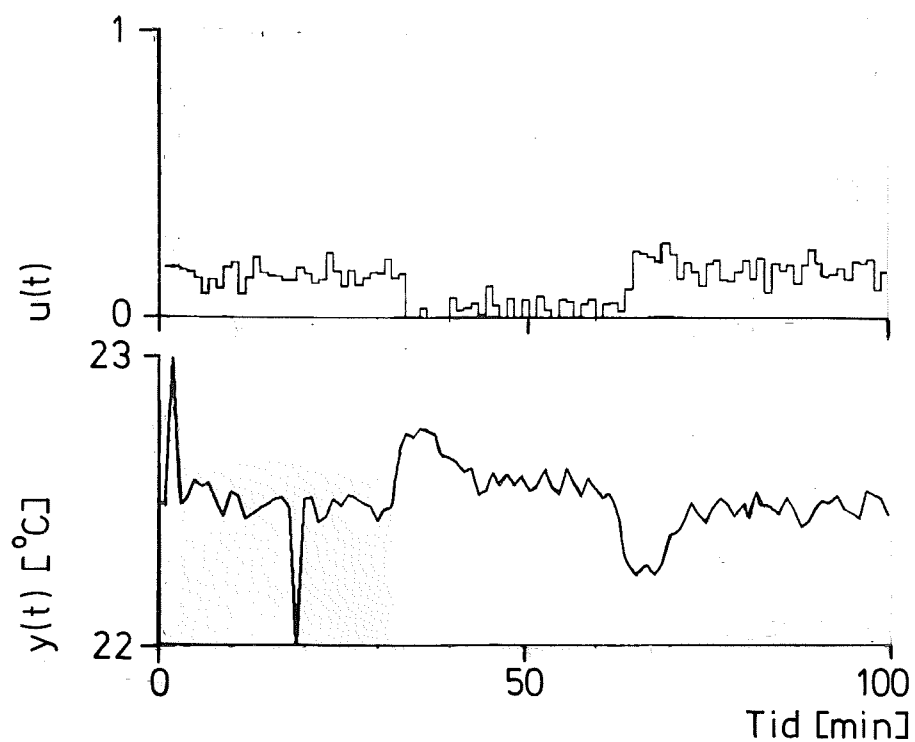


FIG 7.24 - Experiment med ett patientrum och en digital PID-regulator (7.16).  $u(t)$  är pulslängdsförhållande.  $y(t)$  är lokaltemperatur i  $^{\circ}\text{C}$ . Börvärdet är  $22.5^{\circ}\text{C}$ .

#### 4. REGLERING AV ELBATTERI MED KVOTREGULATOR

I detta avsnitt ges ett exempel på reglering med kvotregulatorn.

##### Process

Ett elbatteri för uppvärmning av luft har undersökts. Batteriets effekt regleras i 100 steg med hjälp av ett tyristoraggregat. Luftflödet genom batteriet är ca  $600 \text{ m}^3/\text{h}$ . Vid maximal effekt 2 kW kan luften värmas ca  $9^\circ\text{C}$ . Lufttemperaturerna före och efter batteriet mäts. Målet med regleringen är att den luft som lämnar batteriet skall ha konstant temperatur.

##### Modell

En matematisk för processen har bestämts med processidentifiering. Följande modell har erhållits

$$y(t) - 0.84 y(t-1) = 0.60 u_1(t-1) + 0.17 u_2(t-1) \quad (7.17)$$

där  $y$  är den utgående luftens temperatur i  $^\circ\text{C}$ ,  $u_1$  är effekten i kW och  $u_2$  är luftens ingångstemperatur. Tidsenheten är 30 s. Om den samplade modellen räknas om till en motsvarande tidskontinuerlig modell erhålles ett system med en tidskonstant på 3 min och förstärkningen  $3.6^\circ\text{C}/\text{kW}$  resp  $1.05^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$  värdena på förstärkningarna stämmer bra med värdena  $4.5^\circ\text{C}/\text{kW}$  och  $1^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$  som kan beräknas ur en enkel energibalans såsom diskuterats i kapitel 5.

##### Reglering

En kvotregulator som reglerar luftens temperaturstegring i batteriet har provats. Regulatorn beskrivs av

$$u(t) = u(t-1) (y_r - z(t)) / (y(t) - z(t))$$

där



$y(t)$  = lufttemperatur efter batteri

$y_r$  = lufttemperatur börvärde

$z(t)$  = lufttemperatur före batteri

$u(t)$  = effekt

### Experiment

Resultaten från två experiment visas i FIG 7.25 och FIG 7.26. Två olika samplingsintervall för regulatorn har använts, 2 min i FIG 7.25 och 4 min i FIG 7.26. Figurerna visar resultat från experiment som varat i 150 minuter. Under experimenten har börvärdet varit  $10^{\circ}\text{C}$  under de första 50 minuterna,  $12^{\circ}\text{C}$  under de följande 50 minuterna och  $11^{\circ}\text{C}$  under de sista 50 minuterna.

### Slutsatser

Det är uppenbarligen gynnsamt att använda det längre samplingsintervallet, då dämpningen blir bättre. Det framgår klart av figurerna att kvotregulatorn fungerar bra. De använda regulatorsamplingsintervallen på 2 min och 4 min medför att utsignalen  $y(t)$  beror till 50 % resp 75 % av den senaste insignalen. Fallet med 50 % ger en viss översläng i både in- och utsignal och i fallet med 75 % blir överslängen ännu mindre. Som alternativ till ett långt samplingsintervall för regulatorn kan man använda ett kort samplingsintervall och dynamisk kompensering.

Om luftflödet ändras så ändras elbatteriets förstärkning och tidskonstanter. Kvotregulatorns stora fördel är att den är förstärkningsoberoende. I experimenten har luftflödet dock varit konstant. Enda problemet med kvotregulatorn är hur regleringen skall startas och stoppas. Start och stopp kan ske för ett visst uppvärmningsbehov. Effektpådraget vid första starten är ett fixt värde. Vid nästa start används det senaste värdet på processförstärkningen.

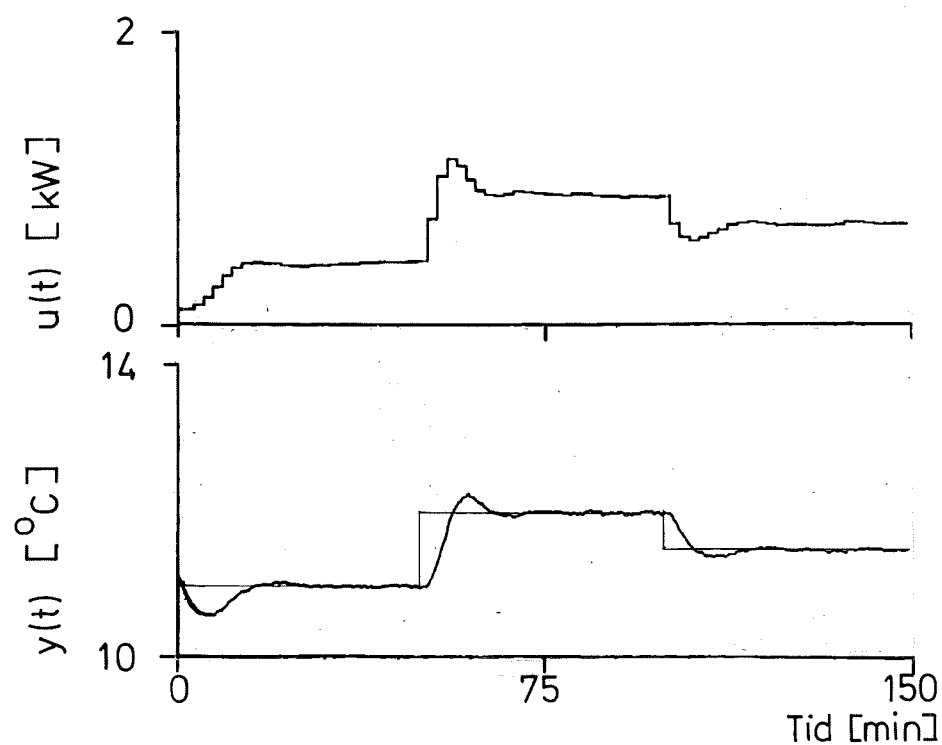


FIG 7.25 - Reglering av elektriskt varmlufts batteri med en kvotregulator. Reglerintervallet är 2 minuter.

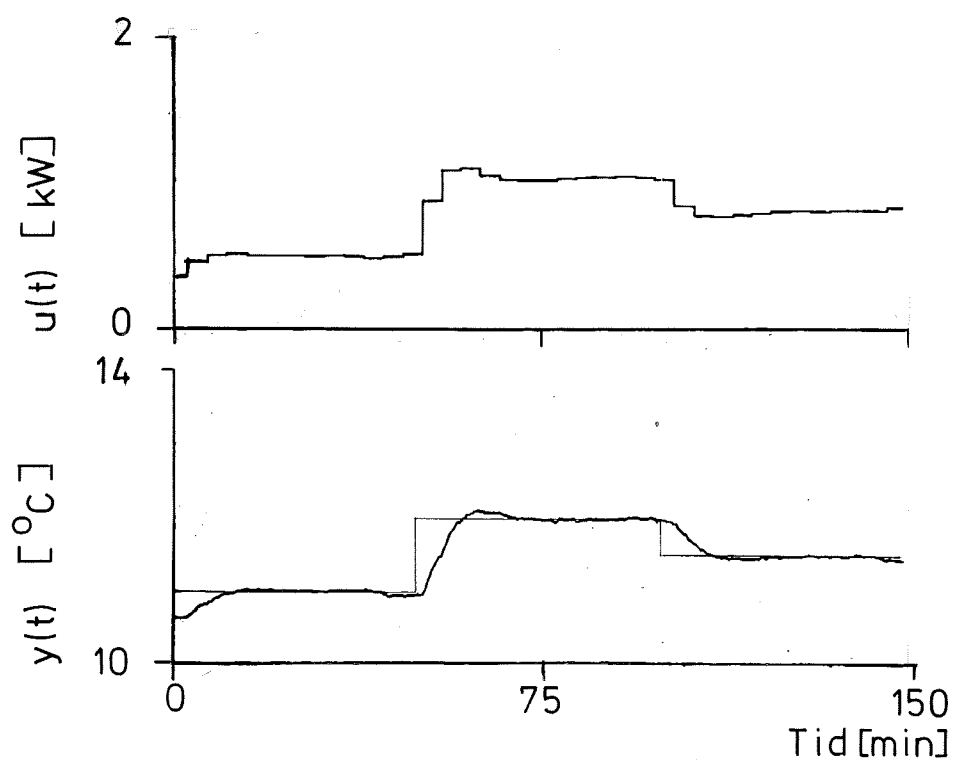


FIG 7.26 - Reglering av elektriskt varmlufts batteri med en kvotregulator. Reglerintervallet är 4 minuter.

## 5. REGLERING AV VÄRMEPUMP MED KVOTREGULATOR

Kvotregulatorn har också använts för tilluftsreglering med en värmepump. Värmepumpen består av fyra kompressorer, som vardera kan köras i två steg. Insignalen kan således endast anta nio olika värden. En värmepump kan regleras med en vanlig analog regulator, där antalet steg som skall kopplas in, bestäms genom att avrunda den analoga regulatorns utsignal. Om en integrerande regulator används på detta sätt kan systemet själv-svänga så att kompressorsteg ständigt kopplas in och ur. Detta medför att slitaget ökar. Kvotregulatorn har den egenskapen att den ständiga in- och urkopplingen försvinner. Istället erhålls en avvikelse i tilluftstemperatur som varierar med behovet/belastningen. Arbetet med värmepumpen finns utförligt beskrivet i Nordström och Svensson (1977).

### Process

Värmepumpen används för uppvärmning större delen av året. Sommartid kan den reverseras för kyl drift. Temperaturtillskottet i tilluften är en svagt olinjär funktion av antalet steg. Detta beror på att kondensorbatteriytan är konstant och att förångarytan ej ökas i förhållandet till antalet steg. Värmepumpens dominerande tidskonstant är 8 min. Processförstärkningen varierar från  $2^{\circ}\text{C}/\text{steg}$  till  $4^{\circ}\text{C}/\text{steg}$ .

### Reglering

En P-regulator kan i regel ej användas, då dess förstärkning måste vara liten för att inte regleringen skall bli instabil. Den låga förstärkningen leder till att P-felet blir stort. Endast några av de önskade stegen inkopplas.

Ett alternativ är att använda en PI-regulator, men detta leder till att ett steg ständigt kommer att kopplas in och ur vid en viss belastningsnivå. Detta är olämpligt på grund av slitage.

Ett annat alternativ är att använda enbart framkoppling. Detta innebär att vid t ex värmning av luft mäts temperaturen före värmebatteriet. Om

värmepumpens värmeeffekt per steg är känd kan rätt antal steg kopplas in. Observera att om värmepumpens värmeeffekt per steg varierar kan framkopplingen ge ett dåligt resultat.

Ett bättre alternativ är att använda kvotregulatorn för att reglera temperaturökning eller temperaturminskning över tillufts batteriet. Fördelen med kvotregulatorn är att det i stationärt tillstånd inte sker någon onödig in- och urkoppling av ett steg så som sker i PI-regulatorn. Nackdelen är att ett konstant reglerfel erhålls. Om temperaturökningen per steg är förhållandevis liten, kan det statiska felet tolereras. Om regulatorns kontinuerliga utsignal trunkeras till ett helt antal steg, blir reglerfelet alltid negativt vid uppvärmning. Om istället avrundning sker, blir reglerfelet lika ofta positivt som negativt. Kvotregulatorn kan också utformas så att reglerfelet alltid blir positivt.

Regulatorns samplingsintervall sättes till 1 minut och dynamisk kompensering användes enligt uttrycken nedan.

$$u_1(t) = u_2(t)[y_r(t) - z(t)] / [y(t) - z(t)]$$

$$u_2(t) = a u_2(t-1) + (1-a) u_3(t-1)$$

$$u_3(t) = f[u_1(t)]$$

där

$$u_1(t) = \text{önskad styrsignal}$$

$$u_2(t) = \text{tillstånd för dynamisk kompensering}$$

$$u_3(t) = \text{utställd styrsignal}$$

$$y(t) = \text{ärvärde (tilluft)}$$

$$y_r(t) = \text{börvärde (tilluft)}$$

$$z(t) = \text{framkopplingsvärde (uteluft)}$$

Funktionen  $f$  rundar av indata och ändrar utdata högst två enheter (två kompressorsteg) per samplingsintervall. Högst en kompressor får startas eller stoppas per reglerintervall (stora startströmmar).

## Experiment

Två reglerexperiment, med och utan kompensering av dynamiken, återges i FIG 7.27 och FIG 7.28. Kurvorna visar att kvotregulatorn har ett statistiskt fel vid reglering av stegprocesser och att regulatorn med kompensering av dynamiken ej kopplar in eller ut fler steg än vad som behövs vid en börvärdesändring. Observera att i fallet utan dynamisk kompensering begränsas insignalen till 8 steg. Reglerförloppet hade givetvis blivit ännu sämre om insignalen varit obegränsad uppåt. Observera också att i experimentet med kompensering finns bara fyra in- och urkopplingar. Man kan visa att i detta fall går det ej med färre omställningar. För samma experiment erhålles 26 in- och urkopplingar med en PI-regulator.

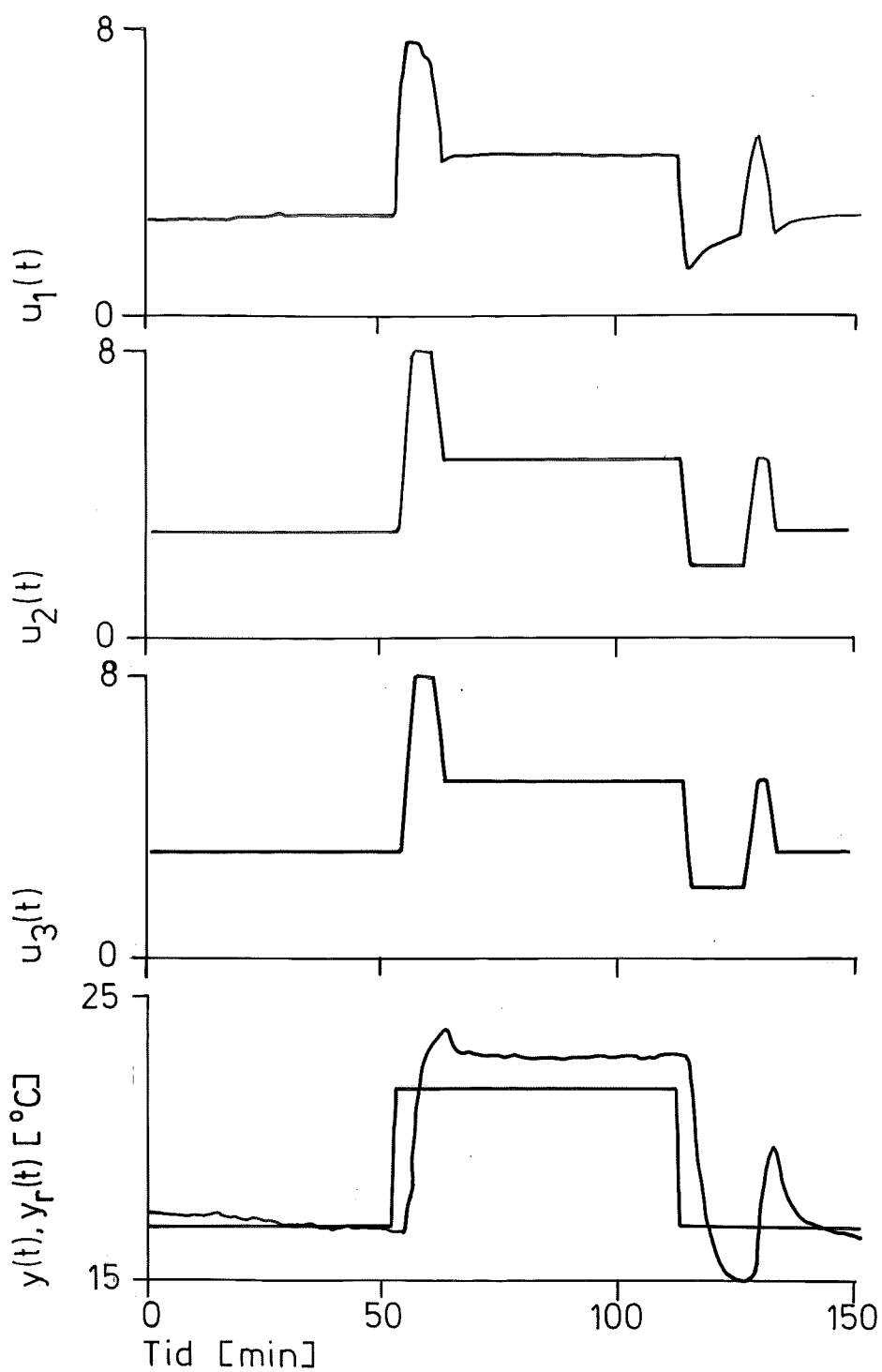


FIG 7.27 - Reglerexperiment med värmepump och kvotregulator utan dynamisk kompensering. Reglerintervallet är 1 minut.

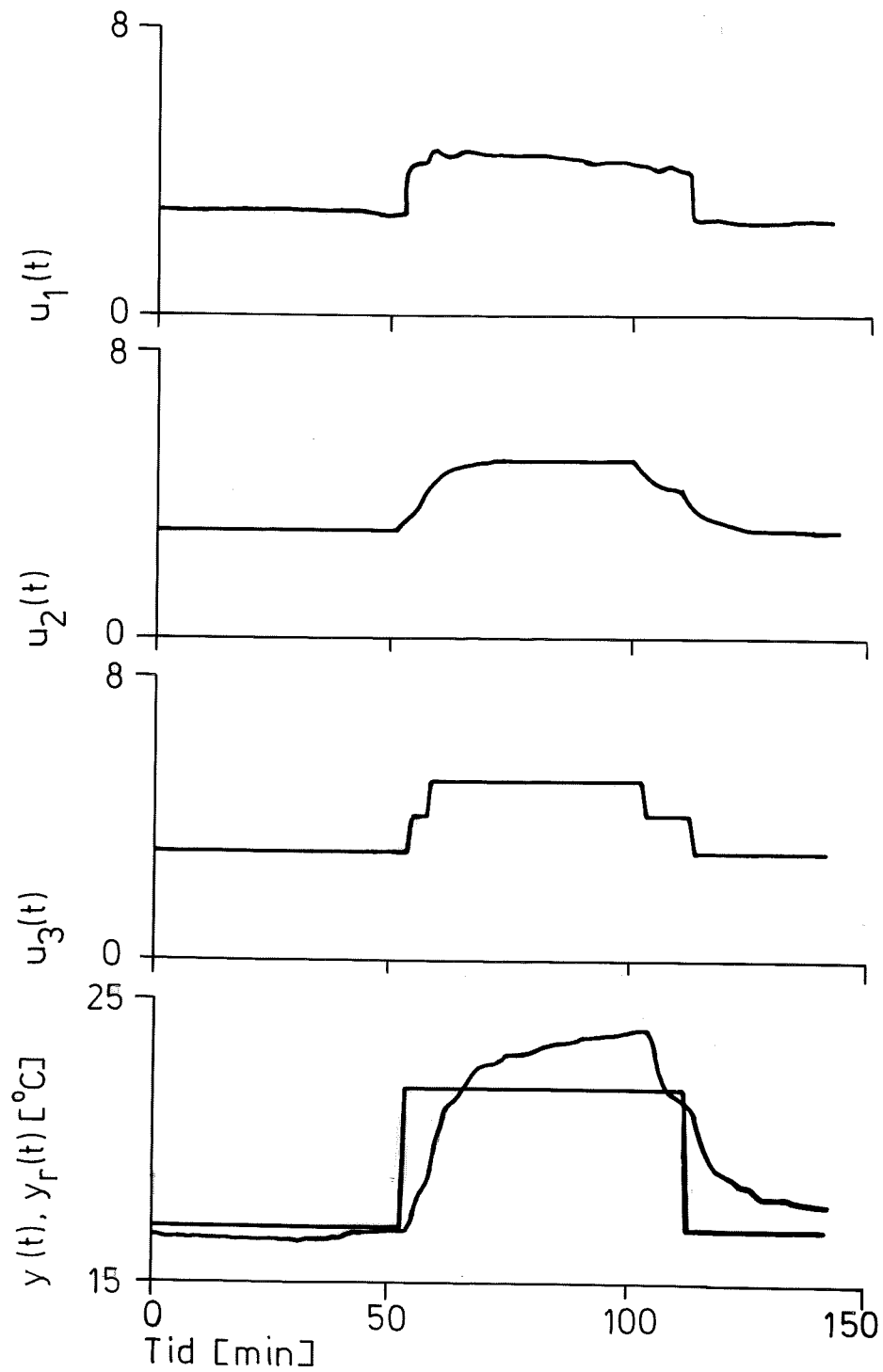


FIG 7.28 - Reglerexperiment med värmepump och kvotregulator med dynamisk kompensering ( $a = 0.8$ ). Reglerintervallet är 1 minut.

## 6. TILLUFTSREGLERING MED EN ENTALPIVÄXLARE

Matematiska modeller för en entalpiväxlare presenterades i avsnitt 4 i kapitel 5. I detta avsnitt skall reglering av en entalpiväxlare diskuteras. En lämplig regulatorstruktur har valts genom att utgå från de fysikaliska modellerna. Regulatorn har provats genom praktiska försök. Dessa har genomförts i samarbete med Angpanneföreningen och arbetet finns dokumenterat i Jensen och Hänse (1974e).

### Reglering

De teoretiska och experimentella modellerna visar att entalpiväxlarens dynamik är snabb och att den kan försummas vid ett samplingsintervall på 1 minut. Eftersom entalpiväxlaren är en del i ett klimatsystem, vars dominerande tidkonstant är omkring 10-20 min, kan reglering ske med ett samplingsintervall på en minut. Entalpiväxlaren kan antas vara en helt statisk process.

Problemet med entalpiväxlaren är att klara av förstärkningsvariationen mellan varvtal (insignal) och tilluftstemperatur (utsignal). Förstärkningsvariationen kan delas upp i två delar: dels en del som beror på entalpiväxlaren själv och dels en del som beror på temperaturskillnaden mellan returluft och uteluft, som är de andra två insignalerna till processen. Den senare delen kan klaras av genom framkoppling från dessa två signaler. Detta kan ske genom att reglera på verkningsgraden i stället för på tillufttemperaturen. Aktuell och önskad verkningsgrad,  $v(t)$  resp  $v_r(t)$ , fås som

$$v(t) = \frac{y(t) - u_1(t)}{u_2(t) - u_1(t)}$$

$$v_r(t) = \frac{y_r - u_1(t)}{u_2(t) - u_1(t)}$$

med beteckningarna



$y(t)$  = aktuell tilluftstemperatur

$y_r$  = önskad tilluftstemperatur

$u_1(t)$  = uteluftstemperatur

$u_2(t)$  = returluftstemperatur

För att klara av entalpiväxlarens egen olinjäritet valdes en självinställande regulator med två parametrar. Regulatorn har beskrivits i kapitel 6 avsnitt 3. Först skattas olinjäriteten, verkningsgrad  $v(t)$  som funktion av varvtal  $u_3(t)$ , med en rät linje i den aktuella arbetspunkten.

$$v(t) = k u_3(t) + \ell$$

Med de skattade parametrarna  $\hat{k}$  och  $\hat{\ell}$  kan det önskade varvtalet beräknas som

$$u_3(t) = (v_r - \hat{\ell}) / \hat{k}$$

I FIG 7.29 återges ett blockschema för reglering av entalpiväxlaren.

### Experiment och slutsatser

Två experiment med den självinställande regulatorn skall återges här. Tilluftens börvärde har ändrats några gånger per experiment. Detta börvärde har valts så att entalpiväxlaren har arbetat med olika verkningsgrader. För experimenten redovisas följande:

tilluftens börvärde i °C	$y_r(t)$
tilluftens ärvärde i °C	$y(t)$
verkningsgrad börvärde (beräknat)	$v_r(t)$
verkningsgrad ärvärde	$v(t)$
varvtal börvärde (beräknat) i varv/min	$u_{3r}(t)$
varvtal ärvärde i varv/min	$u_3(t)$
parametern $\hat{k}$ i min/varv	$\hat{k}(t)$
parametern $\hat{\ell}$	$\hat{\ell}(t)$

I FIG 7.30-31 återges försöksresultaten, när tilluftens börvärde har

varierats var 30:e minut så att motsvarande verkningsgrad blev omkring 50, 45, 40, 35 och 30 %. Glömskefaktorn har varit 0.9, vilket är ett lågt värde när konstanta parametrar skall identifieras. Ett lågt värde är däremot bra vid följning av parametrar som varierar, vilket är fallet då arbetspunkten ändras.

Överensstämmelsen är god för höga verkningsgrader, dvs i början av experimentet, men i slutet är överensstämmelsen sämre. Avvikelserna beror på att varvtalsregleringen fungerar dåligt. Undre gränsen för vad drivmotorn kan klara av ligger omkring 5 % av det maximala varvtalet, vilket ger 0.5 varv/min. En eventuell obalans i rotorn försvårar varvtalsregleringen ytterligare. Parametern  $\hat{k}$  ökar med sjunkande verkningsgrad och motsatsen gäller för parametern  $\hat{\ell}$ . Detta är helt i överensstämmelse med de teoretiska och experimentella modellerna.

Efter övergången till det lägsta tilluftbörvärdet avviker tilluftstemperaturen och verkningsgraden mycket från de önskade värdena. Detta beror på att parametrarna  $\hat{k}$  och  $\hat{\ell}$  ej passar för den nya arbetspunkten, vilket medför att varvtalet blir för lågt. Efter viss tid har parametrarna  $\hat{k}$  och  $\hat{\ell}$  antagit nya värden och avvikelserna i tillufttemperatur och verkningsgrad har då minskat. Sist i experimentet ökas tilluftstemperaturbörvärdet, varvid parametrarna  $\hat{k}$  och  $\hat{\ell}$  åter ändrar sig. Felet i tilluftstemperatur och verkningsgrad orsakas av felaktigt varvtal.

Experiment som visar hur regulatorn kan klara störningar i returluften har också genomförts. Vid dessa experiment har störningar genererats genom att tända och släcka belysningen. Experimenten varade i 300 minuter. I varje 100 minuters period var lyset först släckt i 30 minuter, sedan kopplades lyset till i 35 minuter och sedan släcktes lyset. Resultaten av experimentet visas i FIG 7.32 och FIG 7.33.

Regleringen är bra vid verkningsgraden 50 % och 65 %. Vid 35 % verkningsgrad inträffar tre kraftiga störningar i temperaturen. Dessa störningar orsakas även här av varvtalsregleringen. Varvtalet ligger under 0.5 varv/min. Det låga varvtalet beror på att utelufttemperaturen var mellan 10 och 15 °C och luftfuktigheten hög när försöken genomfördes. Vid låga varvtal växlar entalpiväxlaren ingen entalpi mellan luftströmmarna. I stället avger uteluften vatten till rotorn och returluften mottager vatten

från rotorn. Förutsättningen är att uteluftens relativa luftfuktighet är större än returluftens. När ångbildningsvärmets och lösningsvärmets (salt i rotormassan) frigörs värms uteluften. Motsatsen sker för returluften. Entalpiväxlaren arbetar nu som en tork. Denna effekt beskrivs ej av de teoretiska modellerna, eftersom modellbygget ej har behandlat luftens och rotormaterialets vatteninnehåll.

En allmän slutsats är att den föreslagna reglerstrukturen har många fördelar. Det är bra att välja verkningsgraden som reglerad storhet, då den ger värdefull information om processens drifttillstånd. Man vet t ex att verkningsgraden ligger mellan 0 och 75 %. Genom parameterskattningen kan de stora förstärkningsvariationerna i relationen mellan varvtal och verkningsgrad elimineras.

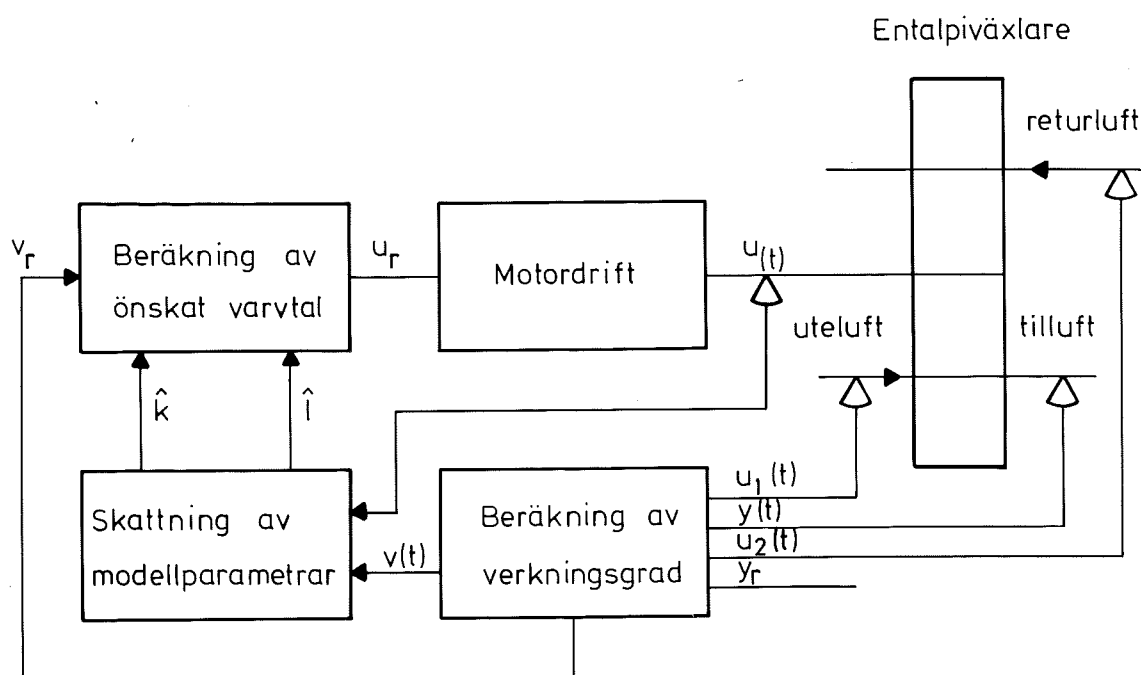


FIG 7.29 - Principschema för tillluftsreglering med entalpiväxlare.

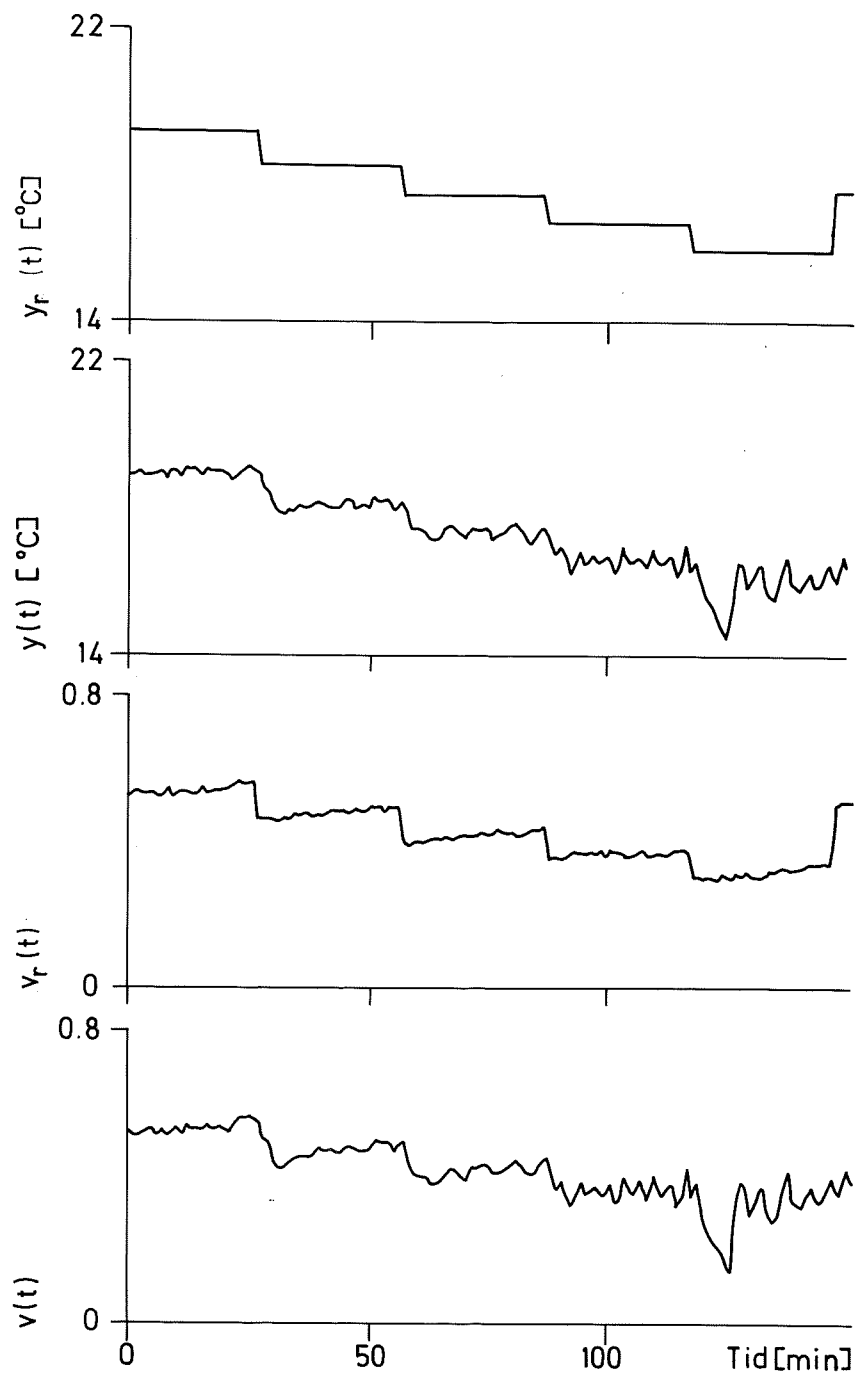


FIG 7.30 - Experiment med en självinställande regulator med två parametrar. Samplingsintervall är 1 minut. Kurvorna är uppifrån: önskad temperatur  $y_r(t)$  i  $^{\circ}\text{C}$ , uppmätt temperatur  $y(t)$  i  $^{\circ}\text{C}$ , önskad temperaturverkningsgrad  $v_r(t)$  och uppmätt verkningsgrad  $v(t)$ .

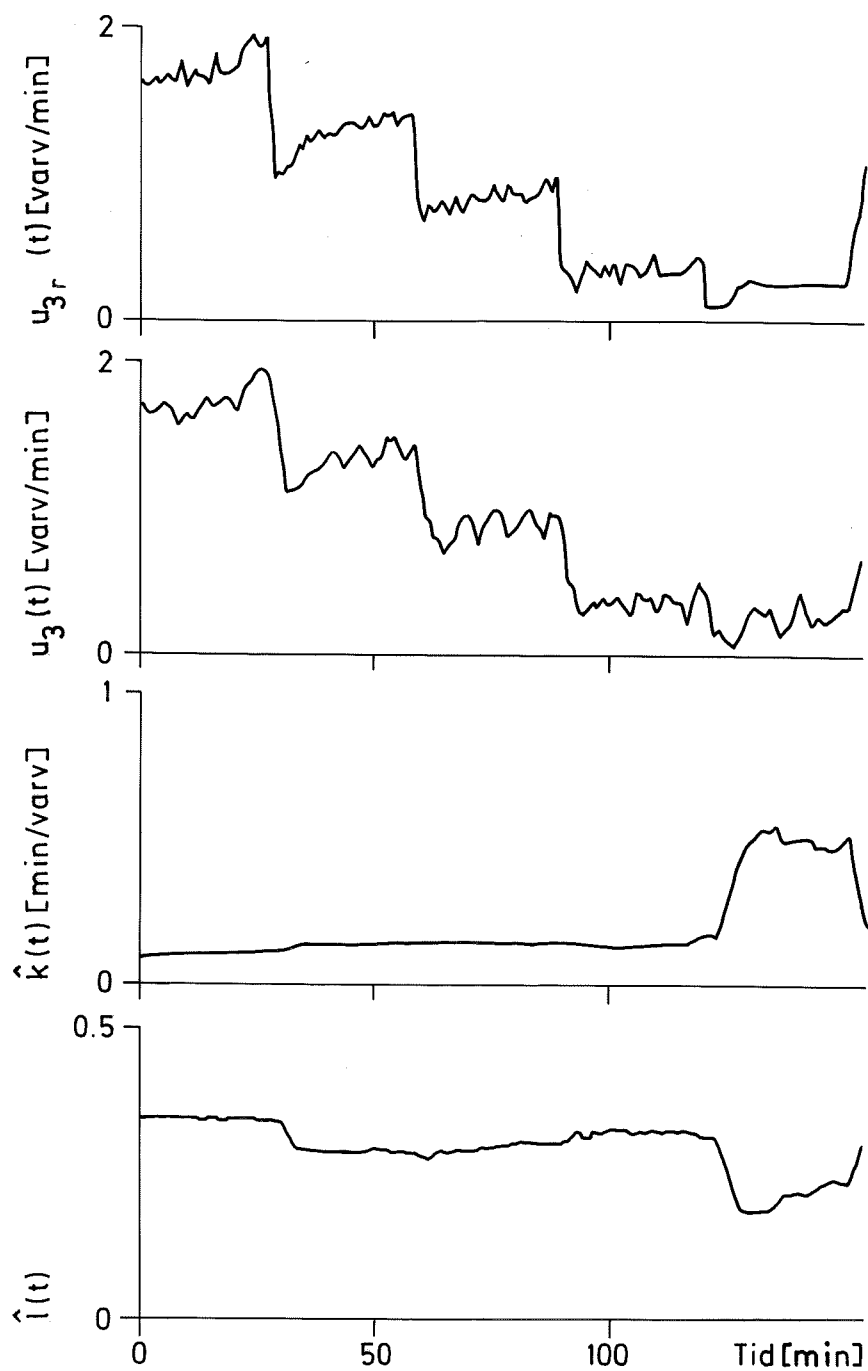


FIG 7.31 - Experiment med en självinställande regulator med två parametrar. Samplingsintervallet är 1 minut. Kurvorna är uppifrån: önskat varvtal  $u_{3r}(t)$  i varv/min, uppmätt varvtal  $u_3(t)$  i varv/min och de identifierade parametrarna  $\hat{k}(t)$  i min/varv och  $\hat{l}(t)$ .

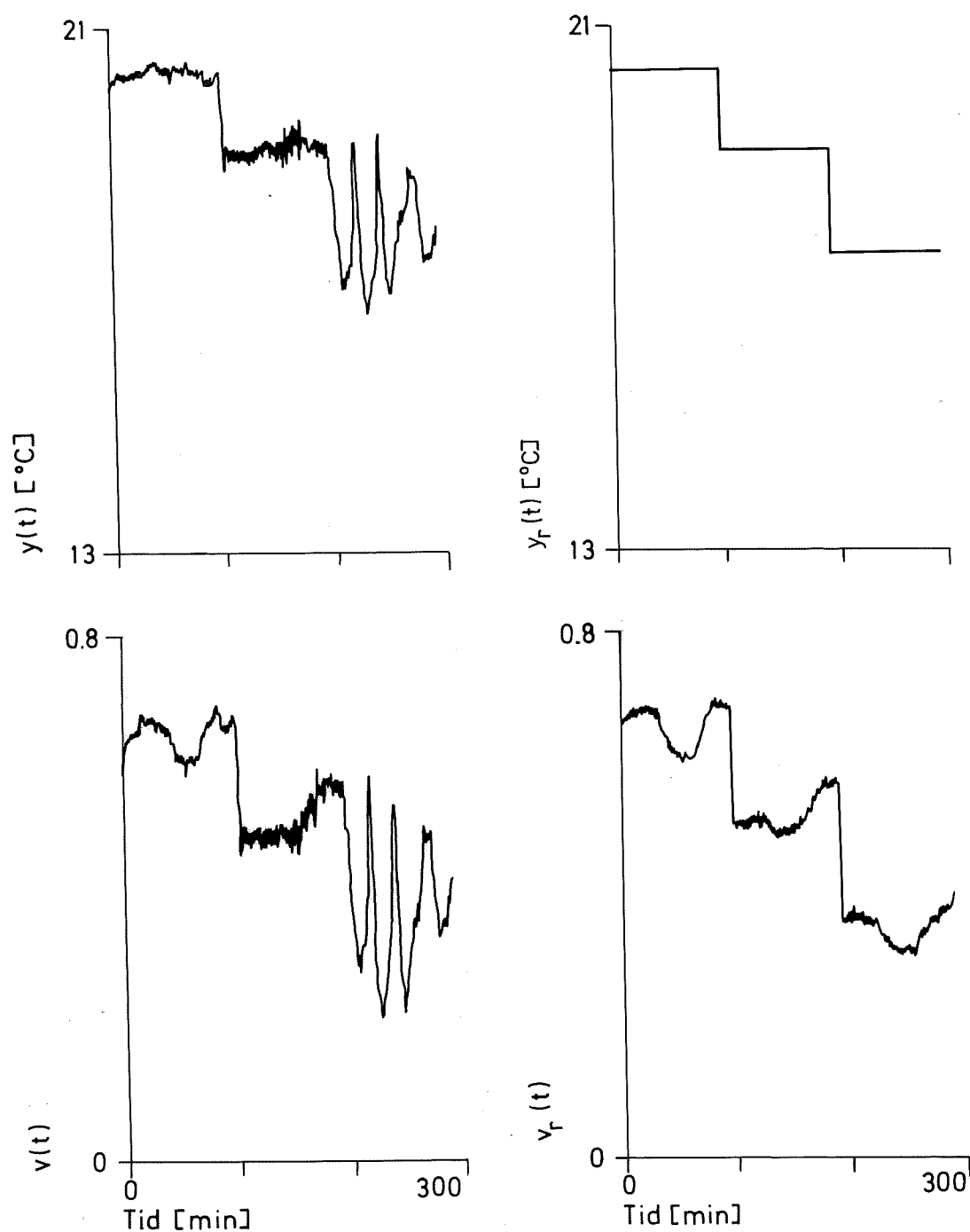


FIG 7.32 - Experiment med självinställande regulator med två parametrar. Samplingsintervall är 1 minut. Kurvorna är uppifrån: önskad temperatur  $y_r(t)$  i  $^{\circ}\text{C}$ , uppmätt temperatur  $y(t)$  i  $^{\circ}\text{C}$ , önskad temperaturverkningsgrad  $v_r(t)$  och uppmätt verkningsgrad  $v(t)$ . Störningar har genererats i returluften.

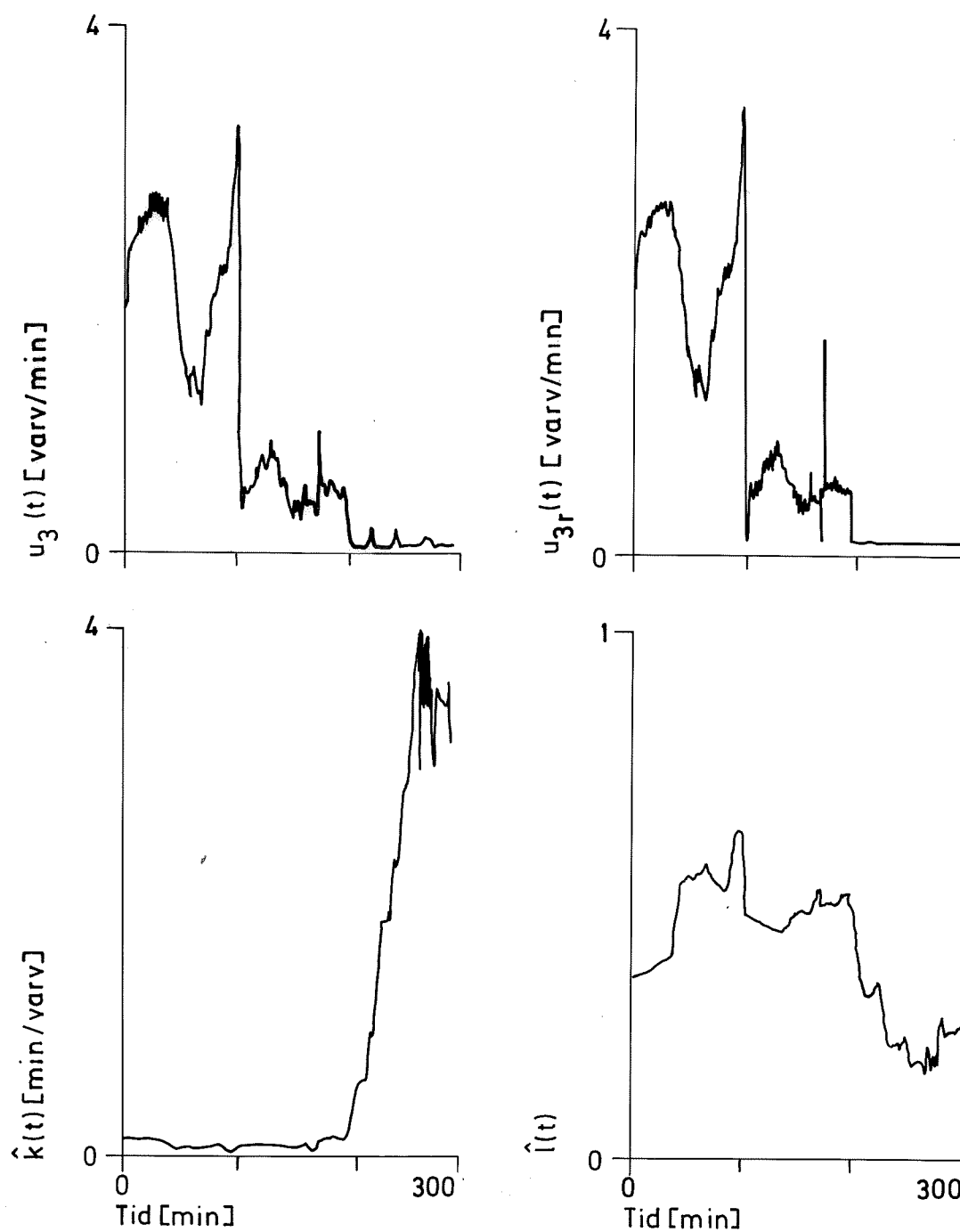


FIG 7.33 - Experiment med en självinställande regulator med två parametrar. Samplingsintervallet är 1 minut. Kurvorna är uppifrån: önskat varvtal  $u_{3r}(t)$  i varv/min, uppmätt varvtal  $u_3(t)$  i varv/min och de identifierade parametrarna  $\hat{k}(t)$  i min/varv och  $\hat{l}(t)$ . Störningar har genererats i returluften.

## 7. EXEMPEL PÅ NYA REGLERPRINCIPER

Om en dator används för reglering finns helt andra möjligheter att använda nya styrprinciper jämfört med konventionell analog instrumentering. I detta avsnitt ges några exempel på förbättrade styrprinciper. Grundtanken är i samtliga fall att undvika svåra reglerproblem genom lämpligt val av mätta och reglerade storheter. Några exempel på sådana val har getts tidigare i kapitel 6 avsnitt 5.

### Reglering av lufttemperatur och luftfuktighet

Luft kan värmas, kylas, befuktas och avfuktas på många olika sätt. Vad dessa luftbehandlingssätt innebär för tillståndsändringar beskrivs bäst med ett Mollierdiagram i FIG 7.34. Luftens tillstånd kan bestämmas på ett flertal sätt med olika givarekombinationer. Följande givare kan tänkas användas:

- torr temperaturgivare
- våt temperaturgivare
- relativ luftfuktighetsgivare
- LiCl-givare
- daggpunkttemperaturgivare

Vad dessa olika mätmetoder registrerar visas i ett Mollierdiagram i FIG 7.35.

Normalt regleras temperatur och relativ luftfuktighet med var sin reglerkrets. Eftersom den torra temperaturen och den relativa luftfuktigheten är starkt kopplade, medför detta att felaktiga regleringrepp kan utföras.

Ett alternativ är att i stället använda vatteninnehållet som reglerad storhet. Vatteninnehållet kan beräknas ur torra temperaturen och relativa luftfuktigheten. Beräkningarna kan lätt utföras i en dator. Vatteninnehållet kan också erhållas efter en linjärisering med enbart en LiCl-givare eller med enbart en daggpunkttemperaturgivare. Detta tillämpas i en del fall med konventionell reglerutrustning. Den vanligaste givareuppsättningen mäter torr temperatur och relativ luftfuktighet.



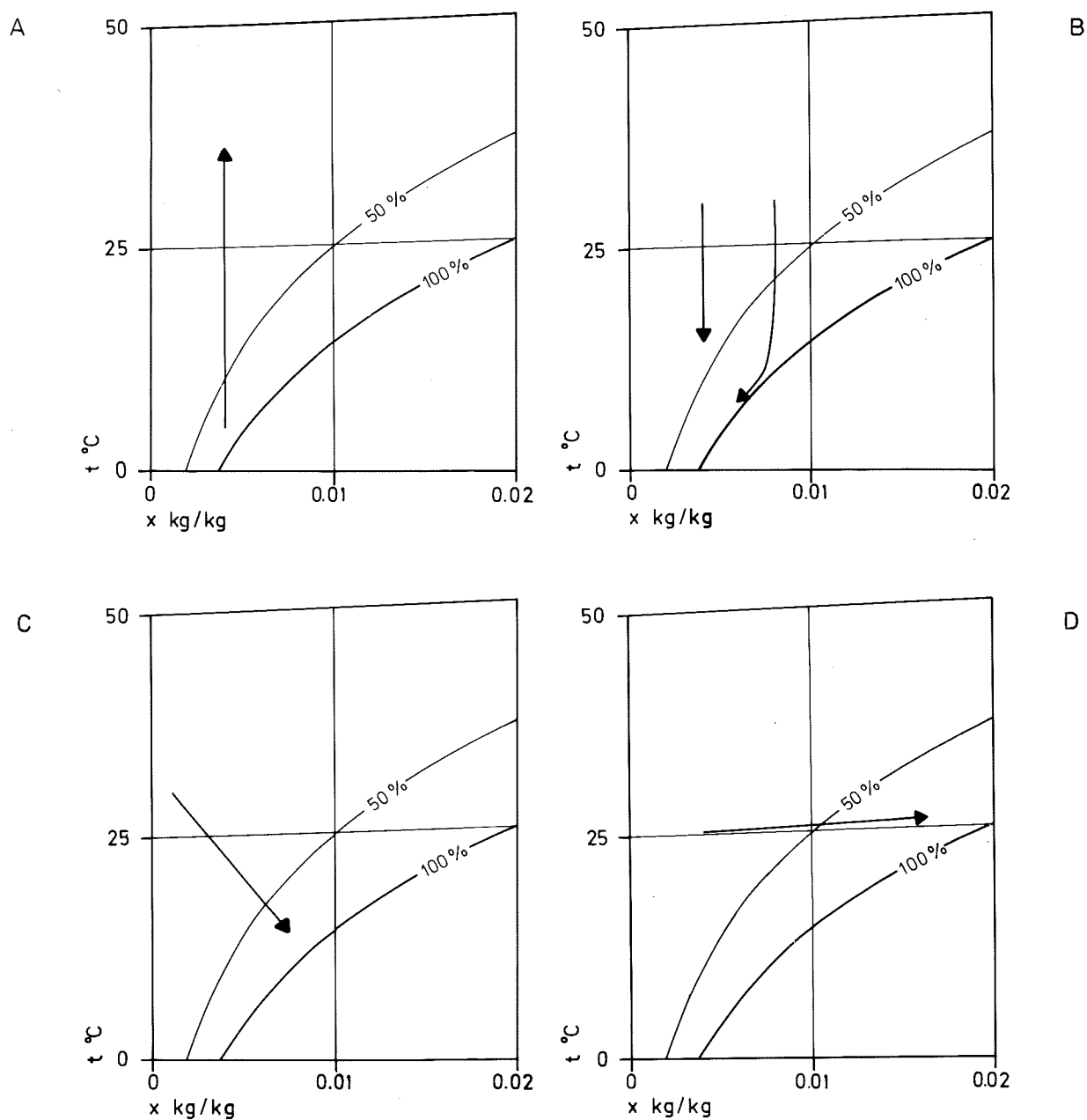


FIG 7.34 - I Mollierdiagrammen återges luftens tillståndsändring i A för värming, i B för kylning och kylning/avfuktning, i C för vattenbefuktning och i D för ångbefuktning.

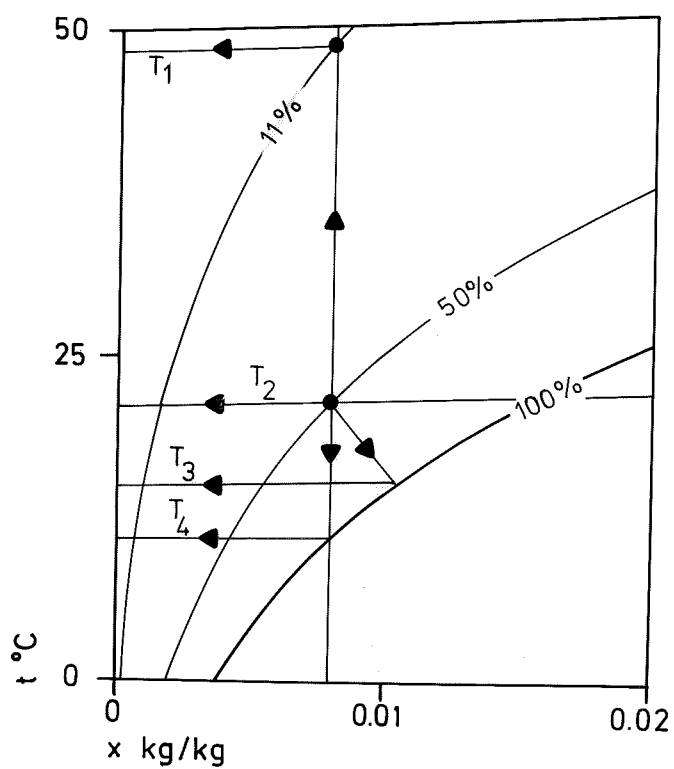


FIG 7.35 - Olika sätt att mäta luftens tillstånd.

Hur avläsning sker för olika typer av givare har markerats med pilar. De olika avläsningarna är  $T_1$  litiumkloridgivare,  $T_2$  torr temperatur,  $T_3$  våt temperatur och  $T_4$  daggpunkttemperatur.

Luftens entalpi eller värmeinhåll är en annan storhet som kan beräknas och styras. I vissa klimatprocesser påverkas enbart luftens entalpi och inte dess vatteninhåll och i andra tvärtom.

### Vattenbefuktning

Befuktningen sker genom att luften passerar en ridå av fina vattendroppar eller passerar stora våta ytor. En del av vattnet förångas, samtidigt som luftens temperatur sänks. Luftens värmeinhåll påverkas endast obetydligt vid befuktningen, om befuktningsvattnets temperatur ej skiljer sig mycket från luftens våta temperatur. En nästan fullständig isärkoppling av tempereringen och befuktningen erhålls då om värmeinhåll och vatteninhåll regleras.

Ett praktiskt användbart regelsätt är att reglera efter torr temperatur och vatteninhåll. Regleringen av befuktaren blir helt oberoende av temperaturregleringen. Detta medför att fuktreglering kan göras bra. Reglerfelen blir små och därmed störningarna på temperaturregleringen. Detta regelsätt tillämpas på ASG storterminal i Malmö.

Det är alltså möjligt att reglera en dyskammare utan att använda sig av dagpunktsreglering, vilket kan vara ganska oekonomiskt i vissa driftsfall.

### Ångbefuktning

Ångbefuktning sker genom att ånga av lågt tryck  $< 300$  kPa sprutas in i en luftkanal. På grund av övertrycket hos ångan innehåller den tillförda ångan mer värme än vid atmosfärstryck. Detta medför att den torra lufttemperaturen ökar vid ångbefuktning med högst  $0.05^{\circ}\text{C/g}$  ånga per kg torr luft vid ett ångtryck av 300 kPa.

En mycket kraftig befuktning med en ökning av vatteninnehållet på 20 g/kg torr luft ger en temperaturökning som är mindre än  $1^{\circ}\text{C}$ . Detta medför att temperaturregleringen kan ske efter enbart den torra temperaturen utan att nämvärt störas av olika befuktningsgrader. Själva befuktningen bör regleras efter vatteninhåll för att undvika onödiga regleringrepp vid temperaturreglerfel.

Vid stora temperaturfel kan det vara olämpligt att reglera på vatteninhåll. Vatteninnehållet kan vara det önskade, men vid stora negativa

temperaturfel kan luften bli alltför mättad och risk för kondens föreligger. Den relativa luftfuktigheten bör alltså begränsas till t ex 90 %. Denna typ av reglering har använts på två klimatanläggningar vid IBM i Järfälla och FERROSAN i Malmö.

#### Avfuktning

Avfuktning kan ske genom att på ett kylbatteri kyla luften så mycket att vattnet kondenserar. Den torra temperaturen påverkas givetvis starkt. Efter kylbatteriet sitter ett värmebatteri som används för att värma luften till önskad torr temperatur.

Regleringen blir enkel. Luftens vatteninnehåll regleras med kylbatteriet och luftens torra temperatur regleras med värmebatteriet.

#### Entalpistyrning

Begreppet entalpistyrning innebär att i anläggningar med returluft styrs återluftinblandningen efter entalpin (värmeinnehållet) hos uteluften och återluften vid kyldrift. När uteluftens entalpi är högre än returluftens, så övergår man till att köra efter minsta tillåtna uteluftmängd, dvs maximal returluftmängd. Innan begreppet entalpistyrning kom, använde man sig av den torra temperaturen hos uteluften/återluften. Detta kunde medföra att man valde fel och fick därför kyla luftströmmen med det större värmeinnehållet. Entalpistyrning är endast aktuell vid höga utetemperaturer, dvs sommartid.

Den energibesparing, som kan uppnås med entalpistyrning i Sverige, är ganska moderat. Det är ytterst viktigt att mätnoggrannheten är god, för om omkoppling sker för tidigt, kan en eventuell besparing i stället bli en förlust. Detta finns bland annat utrett i Jensen (1977).

#### Driftoptimering av anläggning med värmeåtervinning

I de flesta stora klimatanläggningar regleras de olika ingående klimatprocesserna oberoende av varandra. Detta kan vara oekonomiskt att göra för vissa typer av anläggningar. I FIG 7.36 ges ett exempel på en sådan anläggning, som består av en förbehandlingsdel med värmeåtervinning och flera efterbehandlingsdelar med både kyla och värme. Dessa efterbehandlingsdelar försörjer olika lokaler med olika luftflöden och olika temperatur.

Driftskostnaden för förbehandlingsdelen med värmeåtervinning är oftast avsevärt mindre än för efterbehandlingen. I fortsättningen antas det att förbehandlingskostnaden är noll och att efterbehandlingskostnaderna för kyla och värme är skild från noll. Med kostnad avses här enbart kostnaden för uppvärmning och kylning av luften. Problemställningen är följande: Bestäm det börvärde på förbehandlingsens temperatur som ger de lägsta driftskostnaderna för alla efterbehandlingsaggregaten. Normalt sätts detta börvärde till en temperatur i intervallet  $10-15^{\circ}\text{C}$ . Nackdelen är att värmeåtervinningen ej utnyttjas på bästa sätt i alla driftsfall.

Ett enkelt sätt att utnyttja värmeåtervinningen bättre är att reglera den så att precis ett av efterbehandlingsaggregaten stänger för värme. Detta leder till att förbehandlingen körs efter lokalen med lägsta värmebehovet. Om luftmängden till denna lokal är liten i förhållande till de övriga luftmängderna, kan detta vara ett ytterst oekonomiskt sätt att reglera förbehandlingen på. Även om kostnaden för kyla är högre än den för värme, kan det vara ekonomiskt att reglera förbehandlingen så att vissa efterbehandlingsaggregat måste kyla och andra måste eftervärma mindre.

Värme/kylkostnaden  $K_i$  för en efterbehandling  $i$  med flödet  $q_i$  kan skrivas som en funktion av den önskade temperaturen  $T_i$ , förbehandlingstemperaturen  $T_f$ , värmekostnaden  $k_v$  och kylkostnaden  $k_k$ :

$$K_i(T_f) = \begin{cases} k_k q_i (T_f - T_i) & \text{om } T_i \leq T_f \\ k_v q_i (T_i - T_f) & \text{om } T_i > T_f \end{cases}$$

Den totala värme/kylkostnaden kan nu skrivas som

$$K_t(T_f) = \sum_{i=1}^n K_i(T_f)$$

Nu gäller det att finna den temperatur  $T_f$  som ger den lägsta kostnaden  $K_t(T_f)$ . Temperaturen  $T_f$  är begränsad neråt till omkring  $10^{\circ}\text{C}$  (kondensrisk). Vid närmare analys finner man att funktionen  $K_t(T_f)$  endast kan ha ett minimum och detta antas i någon av punkterna  $T_f = T_i$  ( $i=1, n$ ). Kostnadsfunktionen kan anta samma värde i två intilliggande punkter.

De beräkningar som krävs för att finna den optimala förbehandlingstemperaturen, kan enkelt utföras i en dator, där alla önskade efterbehandlings-

temperaturer och luftflöden är kända. Aktuella värden på värme- och kylkostnader kan matas in i datorn så att beräkningarna sker med rätta värden. Kostnadsfunktionen för exemplet i FIG 7.36 har ritats upp i FIG 7.37.

Denna typ av driftsoptimering har tillämpats på FERROSANs nya fabriksanläggning i Malmö.

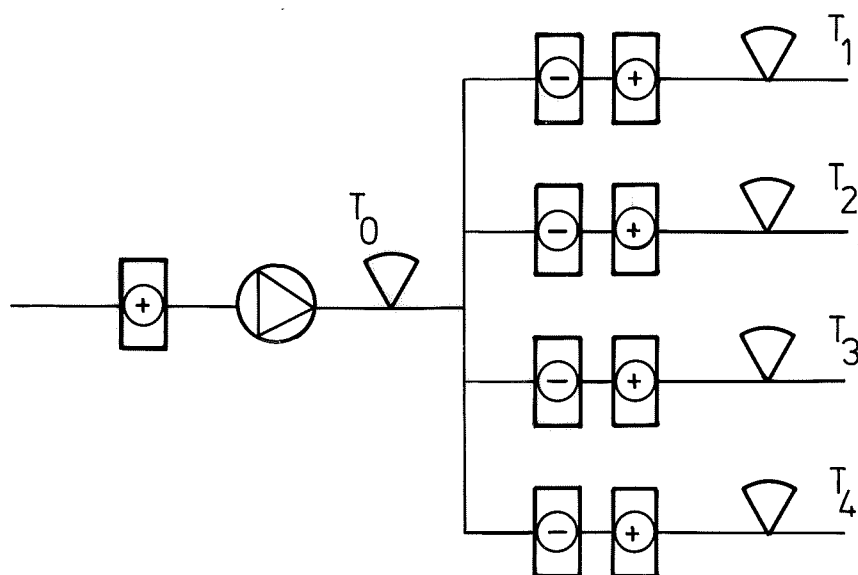


FIG 7.36 - Principskiss för anläggning med värmeåtervinning i förbehandlingsdelen och både värme och kyla i efterbehandlingsdelen.

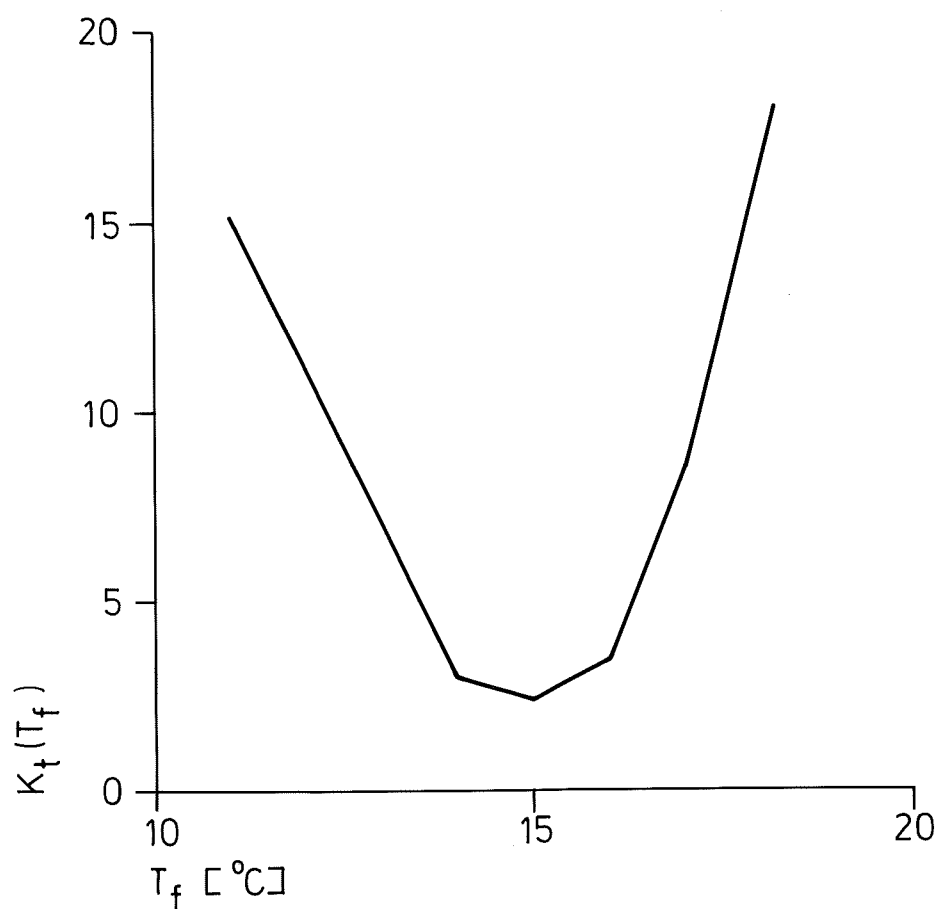


FIG 7.37 - Kostnadsfunktion  $K_t(T_f)$  för anläggningen i figur 7.36. De fyra efterbehandlingsaggregaten har samma luftflöde. De fyra tilluftstemperaturerna är 14, 15, 16 resp 17 °C. Kylkostnaden är dubbelt så stor som värmekostnaden.

Hur stor besparing som kan göras kan beräknas för ett enkelt exempel. Anläggningen antas bestå av ett stort antal efterbehandlingsdelar, vars önskade temperaturer är rektangelfördelade i intervallet (0, 1) temperaturrenheter och vars luftflöden är lika. Kostnaden för värme och kyla antas vara 1 resp  $k$  kostnadsenheter per luftflödesenhet och temperaturrenheter. Den totala värme/kylkostnaden blir i detta fall

$$K_t(T_f) = [(k+1)T_f^2 - 2T_f + 1] / 2$$

för temperaturintervallet (0, 1). Kostnadsfunktionen har ett minimum för

$$T_f = 1 / (k+1)$$

och motsvarande värde på kostnaden blir

$$K_t[1/(k+1)] = k/2(k+1).$$

Besparing relativt kostnaden vid den undre gränsen (samtliga aggregat värmer)  $K_t(0)$  är följande för några olika värden på  $k$ :

$k$	besparing i %
1	50
2	33
3	25

Besparingen kan alltså bli ganska betydande jämfört med reglering efter ett fast börvärde.

### Elpanna

I detta avsnitt ges ett exempel på hur datorn kan användas för att reglera på ett beräknat börvärde. Processen är en elektrodpanna, som kan regleras från en lägsta effekt till en högsta effekt med en skärm, vars läge påverkar geometrin och därmed resistansen och effekten. Eleffekten utvecklas direkt i vattnet. Vattnet utgör motståndet i elpannan.

Utgående vattentemperatur regleras med att påverka ingående vattentemperatur genom återcirkulation av utgående vatten och inblandning av returvatten från förbrukarsidan.

Både effekt och utgående temperatur skall regleras till önskade värden, som kan variera från fall till fall. En av svårigheterna med elpannan ligger i att vattnets elektriska ledningsförmåga ökar med stigande vattentemperatur. Enkla beräkningar visar att vid stor återcirkulation är elpannan instabil vid konstant skärmläge. En annan svårighet är att uppehållstiden i elpannan är omkring en minut, vilket försvårar regleringen av utgående vattentemperatur.



Det är däremot en lätt uppgift att reglera den ingående vattentemperaturen med blandningsventilen. Eleffekten är också lätt att reglera, då eleffekten är proportionell mot skärmens läge.

Det är också en lätt uppgift för datorn att beräkna en lämplig ingående temperatur med ledning av önskad effekt och utgående temperatur och uppmätta värden. I stationärt tillstånd gäller följande enkla värmebalans-ekvation för elpannan:

$$P - qc(T_{ut} - T_{in}) = 0$$

där

$P$  = eleffekt

$q$  = flöde

$c$  = värmekapacitet för vatten

$T_{ut}$  = utgående vattentemperatur

$T_{in}$  = ingående vattentemperatur

Börvärdena för  $P$  och  $T_{ut}$  är givna. Flödet är ej exakt känt, men det kan beräknas medelvärden på  $\bar{P}$ ,  $\bar{T}_{ut}$  och  $\bar{T}_{in}$ , dvs

$$\hat{q} = \frac{\bar{P}}{c(\bar{T}_{ut} - \bar{T}_{in})}$$

Med det skattade flödet  $\hat{q}$  kan den önskade ingående vattentemperaturen beräknas som

$$T_{in\ r} = T_{ut\ r} - P_r / \hat{q} c.$$

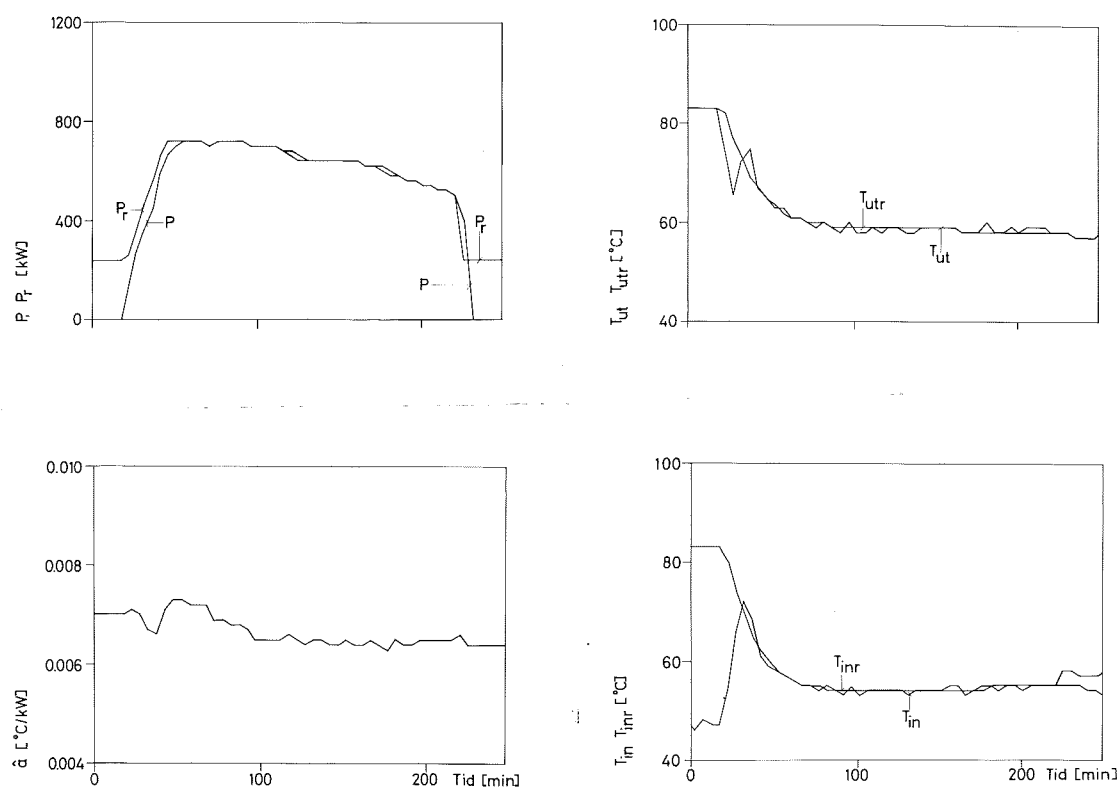
Detta reglersätt medför att vid en felaktig ingående temperatur så blir den utgående temperaturen också felaktig. När effekten avviker från den önskade resulterar detta också i att utgående vattentemperaturen blir felaktig.

Ovannämnda reglersätt tillämpas med gott resultat vid reglering av en elektrodpanna på 2 MW i SCGs kontorshus i Danderyd. För att förenkla beräkningen av  $T_{in\ r}$  så skattades parametern  $a = (qc)^{-1}$  direkt, vilket ger att  $T_{in\ r} = T_{ut\ r} - \hat{a} P$

Regleringen av ingående vattentemperatur sker utan framkoppling från utgående och returvattentemperaturen. Den senare mäts ej. Blandningsförhållandet hade annars kunnat beräknas och reglering hade kunnat ske på denna variabel i stället, vilket hade förbättrat regleringen ytterligare.

I FIG 7.38 återges förloppet under en natt för effekt, in- och utgående vattentemperatur. Den adapterade parametern som motsvarar  $(qc)^{-1}$  finns också med i FIG 7.38. Elpannan körs nattetid (lägre taxa) för att ladda stora vattentankar.

Effekten körs upp efter en ramp. Utgående temperatur körs upp exponentiellt för att undvika en översläng. Vid höga temperaturer kan en liten översläng lösa ut säkerhetsautomatiken. Under natten sker mindre justeringar av effektbörvärdet för att ta igen vad som förlorades under starten.



**FIG 7.38** - Reglering av effekt  $P$  och utgående temperatur  $T_{ut}$  för en elpanna. Ingående vattentemperatur är  $T_{in}$ . Parametern  $\hat{a}$  anger temperaturökning i °C per tillförd effekt i kW.

## 8. REFERENSER

- Adamson, B (1969): Program för studier av utomhusförhållandenas inverkan på rumsklimatet. IB, LTH, Arbetsrapport 1969:2.
- Apelblat, J, Jensen, L och Rydström, P (1977): Frånluftstemperaturreglering av flerfamiljshus. IBR, LTH, Arbetsrapport 1977:12.
- Ekström, L, Hänsel, R, Jensen, L och Ljung, L (1974a): Different dynamic models in an airconditioned building. DBSAC, LIT, WR 1974:1.
- Ekström, L, Hänsel, R, Jensen, L och Ljung, L (1974b): Experiments with computer control of an air conditioning plant. DBSAC, LIT, WR 1974:2.
- Jensen, L och Ljung, L (1973): Experiments with computer control of room air temperature. DBSAC, LIT, WR 1973:11.
- Jensen, L (1974c): Dynamic models for electrical treating devices in climate control. DBSAC, LIT, WR 1974:6.
- Jensen, L och Hänsel, R (1974d): Computer control of room air temperature by onoff control of a postheater. DBSAC, LIT, WR 1974:11.
- Jensen, L och Hänsel, R (1974e): Computer control of an enthalpy exchanger. DBSAC, LIT, WR 1974:8.
- Jensen, L (1976): Digital reglering av klimatprocesser. IBR, LTH, Arbetsrapport 1976:12.
- Jensen, L (1977): Energibesparing vid entalpistyrning. IBR, LTH, Arbetsrapport 1977:14.
- Nordström, H och Svensson, L (1977): Mätning, modellbygge, simulering och reglering tillämpat på en anläggning med värmepump. IBR, LTH, Arbetsrapport 1977:9.



## KAPITEL 8

### ETT PROCESSTYRNINGSSPRÅK

#### 1. INLEDNING

I detta kapitel presenteras ett interpretativt processtyrningsspråk, IPCL (Interpretative Process Control Language), som utvecklats för reglering av klimatprocesser. En detaljerad beskrivning av språket ges i Jensen (1977a). Språket IPCL har idag (nov 1977) använts för att förverkliga ett tiotal processtyrssystem för klimatanläggningar. Se Tour och Andersson (1977). Systemen har byggts kring en minidator Data General med 16 bitars ordlängd. Datorsystemen använder ej något massminne.

Några av de teknisk-ekonomiska övervägandena som legat till grund för språket diskuteras i avsnitt 2. Där behandlas bl a krav från processen och användaren. Dessutom diskuteras val av programmeringssätt och val av språk. Övervägandena leder till att ett högnivåspråk bör användas. Det främsta skälet till detta är att få ner arbetsinsatsen och därmed kostnaden. Ett annat skäl är önskan att programmeringen skall kunna utföras av personer med stor process- och anläggningserfarenhet och ringa programmeringserfarenhet. Det är en klar fördel att en och samma person programmerar och tar en anläggning i drift.

Naturliga krav på ett högnivåspråk är att det skall vara lätt att lära, läsa, programmera, testa, felsöka och ändra i drift. Ett annat krav är att användaren skall ha goda möjligheter att sätta sig in i hur anläggningen skall fungera enligt datorprogrammet. Ett rätt kommenterat högnivåspråk utgör också en god dokumentation av anläggningen. En annan viktig synpunkt är att ett högnivåspråk ej verkar hämmande på möjligheten att utföra omfattande beräkningar eller att prova nya ideer.

Språkets utformning beskrivs och diskuteras kortfattat i avsnitt 3. Det finns flera alternativ beträffande språkets utformning. Det kan baseras

på antingen kompilering eller interpretering. Ett interpretativt processstyrningsspråk är intressant därför att det har hög packningsgrad och därför att skillnaden mellan källkod och absolutkod kan göras liten. Varje operation eller operand består i regel av ett ord. Det är därför enkelt att ändra eller att lägga in ny kod on-line. Detta är viktigt i ett datorsystem med enbart primärminne där det kan vara mycket tidsödande att stoppa systemet, ändra och ladda in ny kod.

Regleralgoritmerna utgör en viktig del av ett processtyrningsspråk. Dessa beskrivs i avsnitt 4. Synpunkter på utformningen behandlas också.

Det är förhållandevis lätt att utveckla en interpretator. Detta beskrivs kortfattat i avsnitt 5. Den använda uppbyggnaden av instruktionskoden torde också kunna överföras till ett annat datorfabrikat med ordlängden 16 bitar. Problemen ligger snarare i hur språket skall se ut och vilka avvägningar som måste göras. Ett annat problem är konverteringsprogrammet.

Operatörskommandon, som utgör en viktig del i språket, behandlas i avsnitt 6.

## 2. VAL AV SPRÅK

I detta avsnitt ges en översikt av de funktioner som ett processtyrssystem för en klimatanläggning skall kunna utföra. Utgående från dessa krav diskuteras sedan utformningen av ett lämpligt språk. Några av de viktiga avvägningarna som lett till IPCL diskuteras också.

### Processkrav och operatörskrav

Följande funktioner krävs för processtyrning av en klimatanläggning:

#### Programstyrning

- start och stopp
- förregling
- sekvensstyrning
- tidsstyrning

## Reglering

olika regulatoralgoritmer  
byte av regulator

## Beräkningar

vatteninnehåll  
entalpi  
blandningsförhållande  
verkningsgrad  
optimering

## Operatörskommunikation

testning  
felsökning  
ändring

Uppgifterna ovan kan lösas med (1) ett tabellorienterat standardprogram, (2) ett lågnivåspråk eller (3) ett högnivåspråk. Nedan görs en jämförelse.

Alternativ	1	2	3
Arbetskostnad	låg	hög	låg
Felkällor	få	flera	flera
Utnyttjningsgrad	dålig	måttlig	hög
Lätt att arbeta med	ja	nej	ja
God dokumentation	ja	nej	ja
Utbildning	obetydlig	mycket	måttlig

Alternativ 1 faller på att man inte kan klara av allt och att ett generellt standardprogram blir dåligt utnyttjat. I och för sig kan man tänka sig att lösa udda saker med specialprogrammering med lågnivåspråk. Alternativ 2 har alltför många nackdelar och är därför inte att rekommendera. Återstår bara alternativ 3, vilket jag fastnade för.

För att kunna klara av de krav som tidigare ställts, krävs i stort sett följande operationer och operander:

Logiska variabler, operationer, fördröjningar och tilldelningar  
 Tidkanaler  
 Hoppsatser och villkorssatser  
 Operationer med analoga och öka/minska (integrerande) ställdon  
 Regulatoralgoritmer  
 Flyttalsaritmetik med ärvärden, börvärden och andra reella variabler  
 Subrutinanrop  
 Underprogram

En tidkanal är en logisk variabel som är sann eller falsk beroende på veckodag och på vilka tider som angivits och på rådande klockslag. En tidkanal användes i regel för att starta och stoppa en eller flera klimat-anläggningar.

Analoga ställdon ovan avser strömutgång 0-20 mA och öka/minska ställdon består av en elektrisk motor med fram- och backgång kopplad till en växel-låda, som sedan påverkar själva ställobjektet.

När man fastnat för högnivåspråk, så är nästa fråga vilken typ av högnivåspråk? Valet står mellan ett språk som ger maskinkod och ett interpretativt språk, som tolkar en pseudokod. Nedan görs en jämförelse mellan de två alternativen.

Typ av språk	Maskinkodorienterat	Intepretativt
Kompilatorstorlek	stor	måttlig
Grundplåt	ingen	stor
Packning	dålig	god
Att felsöka	svårt	lätt
Att ändra on-line	svårt	lätt
Att programmera on-line	omöjligt	lätt
Exekveringshastighet	hög	måttlig

Svårigheterna med ett högnivåspråk, som ger maskinkod, är att när en ändring skall göras, så är det underförstått att källkoden skall rättas och att ny kompilering och ny laddning skall ske. Detta är omöjligt att utföra i ett datorsystem utan någon form av diskoperativsystem.



Ett annat viktigt krav är att utnyttjningsgraden eller packningstätheten är hög, vilket är av yttersta vikt i datorsystem med bara primärminne. Endast ett begränsat utrymme finns tillgängligt i primärminnet. Ett datorprogram för klimatprocesser består i regel till mer än hälften av olika indexerade variabler såsom digitala in- och utgångar, mätvärden och börvärden. I högnivåspråken ALGOL och FORTRAN på den aktuella datorn krävs fyra till fem celler för att adressera en indexerad variabel. Ett interpretativt språk kan lätt utformas så att ett ord behövs per indexerad variabel. Villkorliga hopp-satser och villkorssatser är också vanligt förekommande. Platsbehovet för en villkorlig hopp-sats är i FORTRAN, ALGOL och ett interpretativt språk 6, 4 och 2 ord samt 8, 6 och 4 för en villkorssats. Därför torde ett interpretativt programmeringsspråk vara att föredra, trots att själva interpretatorn kan ta åtskilliga hundratal celler. Även högnivåspråken ALGOL och FORTRAN lägger ut en del subrutiner, eftersom själva koden innehåller en hel del subrutinanrop.

Ett problem är behandlingen av logiska variabler i ALGOL och FORTRAN. Ett helord används för att lagra ett logiskt värde, vilket är ytterst platskrävande. Normalt lagras en logisk variabel i en bit av ett ord.

Även om exekveringshastigheten är lägre för det interpretativa språket, hinner man oftast med att utföra alla de uppgifter som skall lösas, eftersom klimatprocesser oftast är långsamma. Om flytträkningen i hårdvara ej finns med, blir skillnaden i exekveringstid mindre, eftersom flytberäkningarna tar lika lång tid oavsett språkets typ.

Språket BASIC har inte nämnts tidigare och detta beror på att den variant, som finns tillgänglig, saknar logiska variabler och operationer. Själva interpretatorn och operatörskommunikationen för BASIC tar omkring 8 k ord. Indexerade variabler refereras med två ord. Packningstätheten är alltså sämre och grundplåten är stor.

### 3. SPRAKET

Det interpretativa processtyrningsspråk som skall presenteras här, kan sägas vara nästan helt interpretativt. Avvikelsen beror på att källkoden konverteras genom att den horisontella notationen ändras till den vertikala. För ett fåtal källkodsinstruktioner byter dessutom en del instruktioner plats. I vissa fall läggs också några räknarceller till. En annan avvikelse är att alla lägen inom programmet anges som relativa första programcellen, och inte med sina ursprungliga lägesnummer eller lägen i form av textsträngar. Den konverterade källkoden kan sedan assembleras, varvid assemblerprogrammet påpekar diverse felaktigheter. Vid assembleringen tas en lista ut som innehåller både källkoden, som kommentarer, och på raderna därefter följer den utlagda koden med den relativa programadressen angiven längst ut på varje rad. Alla ändringar utföres sedan med hjälp av denna lista.

För att konverteringen skall bli så enkel som möjligt och för att källkoden skall likna absolutkoden så mycket som möjligt har parenteser utelämnats och all tilldelning sker från vänster mot höger i källkoden och uppifrån och neråt i absolutkoden. Behovet av parenteser kan diskuteras. Ofta kan det vara lämpligt att beräkna olika mellanresultat som enkelt kan kontrolleras vid uttestning av koden än att kontrollera hela uttrycket på en gång. Vid felsökning är det en klar fördel att ha tillgång till mellanresultat. Exekveringen blir ej heller snabbare med parenteser, eftersom samma mellanresultat måste beräknas och koden tar också lika mycket plats. Upprepad tilldelning är tillåten. Ett beräkningsuttryck kan omfatta flera rader.

Andra inskränkningar, som förenklar själva interpretatorn, är att dubbla operationer ej är tillåtna och att någon heltalsaritmetik ej finns med. Behovet för det senare är obetydligt och i nödfall så kan beräkningar utföras som med flyttal, då IPCL innehåller omvandling från heltal till flyttal och tvärtom.

Kommentarer kan, liksom i FORTRAN, inflikas i koden för att göra den mera lättläst. Tanken är att ett IPCL-program skall kunna användas som dokumentation av funktionen.

Något som kan göra programmet mera lättläst är att programmeraren kan definiera egna identifierare på högst fem bokstäver för de ordinarie vari-

abelnamnen. Detta motsvarar FORTRANs EQUIVALENCE-satser, men de är enklare och tydligare, vilket visas i exemplet nedan för pump P1 på utgång nr 23.

D        P1 = OUT(23)

Något som gör ett program ännu mer lättläst är att använda sig av samma beteckningar, som kan genereras när alla in- och utgångstabeller definieras. Några exempel på sådana identifierare för en klimatanläggning TA-3 är följande:

TA-3-FR	frysvakt
TA-3-MS	motorskydd fläkt
TA-3-SS	start/stopp fläkt

En identifierare ovan består således av en för varje processdel gemensam del sammansatt med en förkortning för en funktion. Identifieraren är självförklarande. Programmeraren behöver inte bekymra sig om vilken in- eller utgång, som är ansluten till vad. En enkel förregling t ex ett startvillkor för TA-3, som skall stoppas om frysvakten eller motorskyddet löser ut och för övrigt skall fläkten vara igång. Den nödvändiga IPCL-koden blir:

TA-3-FR NAND TA-3-MS SET TA-3-SS

Alla beräkningsparametrar läggs utanför IPCL-programmet i externa tabeller för att ändringar skall kunna ske enkelt. Ett undantag är vissa heltals- och flyttalskonstanter, som interpretatorn genererar från en instruktion.

I den följande texten anges minsta och största möjliga index för alla variabler eller procedurer inom den normala parentes. Interpretatorn kontrollerar alltid om en variabels index är tillåtet, annars erhålls en felutskrift, som anger typ av fel och var felet inträffade. Felutskrifter erhålls också vid dubbla operationer, felaktiga adresser och felaktiga indata till subrutiner.

Syntaxen för IPCL återges i appendix A.

Logiska variabler, operationer och tilldelningssatser

Alla de digitala in- och utgångarna kan givetvis behandlas som logiska variabler med namnen

IN(1-10000)

OUT(1-10000)

Logiska funktionsprocedurer är tidkanaler och tidspulser, som ej kan tilldelas ett värde. Dessa skrivs som

TCM(1-1000)

respektive

TIME(fas,period)

En tidkanal är sann eller falsk beroende på klockslag, veckodag och helg. Tidspulsen är endast sann när fasen stämmer överens med räknare för den angivna perioden som kan vara 5, 10, 20, 60 s, 2, 5, 10 eller 60 min. Denna variabel kan användas för att bestämma när en regulator skall exekveras och för att undvika att exekvera programkod varje sekund som interpretatorn genomlöper koden.

En logisk variabel kan negeras med instruktionen NOT, som står före operanden.

En logisk operation mellan två logiska operander kan ge upphov till fyra olika resultat. Det finns därför högst sexton tänkbara operationer. Sex av dessa är degenererade. De övriga tio finns implementerade i IPCL. Det är lätt att implementera flera operationer av samma typ. De flesta logiska system kan lösas enkelt i stället för att operera med ett minimalt antal operationer. Instruktionerna EQ och NE växer ut till ett omfattande uttryck om endast AND, OR och NOT finns tillgängliga. Nedan återges de sexton olika utfallen för olika logiska operationer mellan två operander.

operand A	0	1	0	1
operand B	0	0	1	1
operation	A operation B			
degenererad FALSE	0	0	0	0
NOR	1	0	0	0
TAF (true and false)	0	1	0	0
FAT (false and true)	0	0	1	0
AND	0	0	0	1
degenererad NOT B	1	1	0	0
NE	0	1	1	0
degenererad B	0	0	1	1
degenererad NOT A	1	0	1	0
degenererad A	0	1	0	1
EQ	1	0	0	1
NAND	1	1	1	0
OR	0	1	1	1
FOT (false or true)	1	0	1	1
TOF (true or false)	1	1	0	1
degenererad TRUE	1	1	1	1

Logiska variabler kan tilldelas ett värde från vänster mot höger på sju olika sätt, vilka de är och vad de gör anges nedan.

SET	tilldela
NET	negera och tilldela
DOFF(1-1000)	fördröjt frånslag 1-1000s
DON(1-1000)	fördröjt tillslag 1-1000s
DOFFON(1-1000)	fördröjd ändring 1-1000s
START	ettställning
STOP	nollställning

Eftersom det inte finns parenteser, går det inte att negera ett helt logiskt uttryck med operationen NOT och med nödvändiga parenteser. Detta kan vålla en del svårigheter i samband med tilldelning och därför har instruktionen NET införts. Själva interpretatorn ökar bara med en cell. Upprepad tilldelning kan utföras.

Vid alla fördröjningar jämförs det logiska uttrycket i vänsterledet med den logiska variabeln i högerledet. Något internt tillstånd används inte. Detta är speciellt viktigt vid start eller återstart efter ett strömavbrott, efter vilket alla utgångar nollställs först.

Ett- och nollställning kan också ske med synonymerna ONE och OPEN resp ZERO och CLOSE för att göra programmet mera lättläst. Det förutsätts här att en ettställning av en utgång innebär att motsvarande manöverfunktion aktiveras, t ex en ventil öppnar eller att en pump startar. I de fall där funktionen är omvänd används prefixet I. Den logiska ackumulatorn kan noll- eller ettställas med FALSE resp TRUE.

#### Exempel 1:

Förreglering. Ett luftbehandlingsaggregat skall vara i drift under vissa tidsperioder enligt tidkanal TCM(1) och skall stoppas ifall frysskyddet, ingång IN(20), eller överlastskyddet, ingång IN(21), löser ut. Starten av utgång OUT(13) skall fördröjas i 30s.

TCM(1) TAF IN(20) TAF IN(21) DON(30) OUT(13)

#### Hoppsatser och villkorssatser

För att kunna hoppa ovillkorligt eller villkorligt i programmet, införs följande hoppsatser:

GOTO läge	ovillkorligt hopp
IF logiskt uttryck GOTO läge	hopp om sann
IF logiskt uttryck NOGOTO läge	hopp om falsk

Analogt med instruktionsparet SET-NET har IF-GOTO komplementerats med IF-NOGOTO, beroende på att hela logiska uttryck inte kan negeras. Denna

konstruktion har använts för att koda IF-THEN-ELSE-satsen, som har utformningen:

IF logiskt uttryck THEN kod [ELSE kod] IFEND

IFEND får ej utelämnas.

### Heltalsvariabler och heltalsoperationer

Heltal som kan användas är

NUM(1-255)

IC(0-255)

Variabeln IC är en heltalsfunktionsprocedur som ger ett heltal motsvarande angivet index.

Behovet av heltalsaritmetik är ytterst litet. Förutom tilldelning finns operationen INVERT, som innebär byt tecken och tilldela. Denna operation är vanligt förekommande i samband med sekvens mellan olika ställdon, där omvänd funktion kan förekomma. Eventuella beräkningar kan utföras med flyttal, eftersom omvandling och tilldelning kan ske med operationerna FLOAT och IFIX som ger omvandling från heltal respektive till heltal.

Analoga ställdon behandlas som heltal i intervallet 0-255, vilket motsvarar 0-20 mA i strömsignal. Adressering, maximal och minimal utställning sker med

AOUT(1-1000)

MAXAOUT(1-1000)

MINAOUT(1-1000)

För öka/minska ställdon gäller analogt

IOUT(1-1000)

MAXIOUT(1-1000)

MINIOUT(1-1000)

### Flyttalsvariabler och flyttalsoperationer

Naturliga flyttalsvariabler är mätvärden och börvärden. Det finns dessutom en flyttalsvariabel och en flyttalskonstant, vars värde motsvarar angivet index. De fyra variablerna betecknas som

MV(1-1000)

SV(1-1000)

PV(1-1000)

RC(0-255)

De fyra vanliga räknesätten och tilldelning anges med sina vanliga symboler. Upphöjt till anges med \*\*. Mellanslag krävs före och efter dessa symboler.

Funktionerna min och max skrivs mellan operanderna med symbolerna MIN resp MAX. Denna syntax har sina fördelar, t ex vid val av det minsta av flera flyttal.

De vanligaste matematiska funktionerna finns med i IPCL och de anropas med argumentet efter och inom parentes.

Speciella flyttalsfunktioner har tagits fram för vanligt förekommande beräkningar såsom ett första ordningsfilter (FILT), begränsning till ett intervall (MIX), och max begränsning av en ändring eller en rampfunktion (RAMP). Fördelen med att använda dessa funktioner är dels att funktionsnamnet klarlägger vad det är frågan om och dels att kod och exekveringstid sparas.

En jämförelse mellan två flyttal, som ger ett logiskt värde, kan ske med operationerna RGE, RGT, RLE, RLT, REQ och RNE.

#### Exempel 2:

Flyttalsräkning. Bilda medelvärde av mätvärdena MV(3-5) och lägg resultatet i MV(101).

$$MV(3) + MV(4) + MV(5) / RC(3) = MV(101)$$



### Regulatoranrop

En regulators styrsignal beräknas när interpretatorn påträffar

REG(1-1000)

Fördelen är att speciella beräkningar kan utföras både före och efter regulatoranropet. Ordningsföljden mellan två regulatorer i kaskad vållar inga problem. Anropet av en regulator kan upphöra samtidigt med att processen stängs av. Regulatorutgången kan tilldelas ett lämpligt värde. Byte av regulatorer kan också ske. Varje regulatorbeskrivning tar elva ord. Alla regulatorernas datablock ligger lagrade i en tabell. Enda nackdelen är att samplingsintervallet inte kan ändras enkelt utan att ändra programmets exekveringssätt. Regulatorsubrutinen beskrivs närmare i avsnitt 4.

#### Exempel 3:

Sekvens. En värmeventil och en kylventil styrs av var sin regulator, REG(1) resp REG(2). Olika regulatorer måste användas, eftersom förstärkningen är helt olika för de två fallen. Ventilerna är stängda när IN(1) resp IN(2) är sanna. \*

```
IF IN(1) AND IN(2) THEN
    REG(1) REG(2)
ELSE
    IF IN(1) THEN REG(2) ELSE REG(1) IFEND
IFEND
```

### Subrutinanrop

Subrutinanrop sker på formen

```
CALL NAME(NR,A,B,,)
```

Efter subrutinnamnet anges antalet argument med ett heltal och eventuella argument. Subrutinen definieras med raden

## SUBROUTINE NAME

vilket konverteras till ett läge. När operanden

ARG(1-255)

påträffas, läses motsvarande argument in. Här arbetar interpretatorn med två programräknare. Den normala programräknaren pekar på subrutinkoden och hjälpräknaren pekar på cellen före första subrutinargumentet. Detta betyder att en subrutin ej kan anropas av en annan subrutin. Återhopp sker med instruktionen

RETURN

En del beräkningar eller subrutiner blir klumpiga och tidskrävande och andra går kanske inte alls att utföra med IPCL kod. En enkel lösning är att anropa assemblersubrutiner med anropet

## CASM NAME

över etthundra assemblersubrutiner finns tillgängliga i ett IPCL-bibliotek (Jensen 1977b). Interpretatorns avkodning och ackumulatorer utnyttjas på så sätt att själva anropet läggs efter argumenten. Detta sker vid konverteringen.

Assemblerkod kan läggas in i IPCL koden. Instruktionen ASMON och ASMOFF ligger före och efter assemblerkoden, vars rader alla börjar med A.

Exempel 4:

Subrutinanrop. Beräkna uttrycket

$$y = x^2 + 2x + 3$$

med x som indata och y som utdata.

CALL EX(2,X,Y)

END

SUBROUTINE EX

ARG(1) + RC(2) \* ARG(1) + RC(3) = ARG(2)

RETURN

### Godtyckliga index och doloopar

Alla de tidigare indexerade variablerna kan även anges med variabla index I, J och K eller externa heltal NUM(1-1000). De variabla indexen I, J och K kan ökas eller minskas med ett med instruktionerna INC resp DEC följt av aktuellt index.

Vektorelementet I för vektorn A adresseras som A(I).

Matriselementet I, J för matrisen M med raddimensionen N adresseras som M(N,I,J).

De godtyckliga indexen tillsammans med vektorer och matriser kommer bäst till sin rätt i doloopar. Loopindexen är I, J och K. En doloop har utseendet:

```
FOR loopindex = godtyckligt index, godtyckligt index
kod
NEXT loopindex
```

#### Exempel 5:

En matrismultiplikation mellan matrisen A och B med dimensionen NxN sker med följande IPCL kod:

```
FOR I = 1,N
FOR J = 1,N
RC(0) = SUM
FOR K = 1,N
A(N,I,K) * B(N,K,J) + SUM = SUM
NEXT K
SUM = C(N,I,J)
NEXT J
NEXT I
```

Underprogram

Parallell exekvering av flera program som innehåller olika väntesatser kan lösas med underprogram som anropas med

RUN NAME

Återhopp till huvudprogrammet sker med instruktionen

INIT

Vid nästa anrop genomlöps programmet från början. För att kunna ligga och vänta finns instruktionerna

SYNC(fas,period)

WAIT(1-10000)

WAITFOR(logisk variabel)

Den första instruktionen är analog med TIME och programmet väntar tills instruktionen blir sann. Den andra instruktionen väntar en given tid och den tredje väntar tills att en logisk variabel blivit sann.

Exempel 6:

Underprogram. Vänta på en startsignal IN(1). Starta en pump OUT(3). Vänta i 20s. Öppna en ventil OUT(2). Vänta på en stoppsignal IN(4) och återställ.

RUN EX

END

PROGRAM EX

WAITFOR(IN(1))

START OUT(3)

WAIT(20)

OPEN OUT(2)

WAITFOR(IN(4))

STOP OUT(3)

CLOSE OUT(2)

INIT

#### 4. REGULATORSUBROUTIN

I detta avsnitt ges endast en kortfattad beskrivning med betoningen lagd på vad som bör ingå i en regulatorsubrutin och vilka avvägningar som måste göras. Vid utformning av en digital regulator bör följande synpunkter beaktas:

- okänslig för ändringar av regulatorparametrar under drift
- begränsning av integralverkan
- begränsning av styrsignaler
- stötfri omkoppling
- upplösning styrsignal

Hur dessa problem skall lösas för de olika standardregulatorerna kommer att behandlas i de nästa tre underavsnitten.

##### PI-regulatorn

En algoritm som löser de flesta problem är:

$$\Delta u(t) = K_p [e(t) - e(t-1) + e(t) / TI]$$

Integrationen sker i regulatorns utsignal och inte i något internt tillstånd. För en strömång eller för en öka/minska utgång medför detta automatiskt att integralen blir begränsad fysiskt. En kaskadutgång begränsas till ett givet intervall som omfattar arbetsområdet för den andra regulatorn. Eftersom integrationen ligger i utgången, blir regulatoralgoritmen också okänslig för ändringar av regulatorparametrar under drift.

Kravet på stötfri omkoppling uppfylls av både öka/minska utgång och kaskadutgång. För att lyckas med detta för strömång krävs tillbäcksläsning av aktuell strömsignal, eftersom den signal som datorn sist ställde ut ej behöver stämma överens med den som råder. Detta inträffar annars efter handkörning eller efter datorbortfall.

Begränsning av stora styrsignaländringar är något som ofta görs. Detta förhindrar att styrsignalen rör sig över hela arbetsområdet i samband med olika störningar vid ett samplingstillfälle.

Eliminering av små styrsignaländringar är önskvärt för att minska slitage. Detta kan dels ske genom att använda sig av en dödzon på reglerfelet inom vilken ingen ändring av styrsignalen sker och dels genom att inte ställa ut små styrsignaländringar. Om upplösningen i en strömutgång sammantaget med processen är låg, kan det inträffa att en bits ändring ger upphov till fullt märkbara svängningar med påföljande slitage. Att eliminera små styrsignaländringar kan leda till stora statiska fel för en PI-regulator. I stationärt tillstånd gäller:

$$\Delta u = K_p(e - e + e/TI)$$

$$e = TI \Delta u / K_p \quad (*)$$

Samma statiska fel  $e$  erhålles också för en I-regulator. Uttrycket ovan kan också användas för att ange fel som uppstår när alltför korta ändringar ställs ut till ett öka/minska ställdon, så att det inte hinner flytta sig (startmotstånd).

Vidare kan uttrycket användas för att undersöka numeriska problem i samband med strömutgång. Strömsignalen erhålls i regel efter en DA omvandling av ett 8 bitars ord. Om integrationen sker i form av detta heltal med ordlängden 8 bitar, kan det möjliga felet beräknas enligt uttrycket (\*).

### P-regulatorn

När det gäller P-regulatorn är differansalgoritmen

$$\Delta u(t) = K_p [e(t) - e(t-1)]$$

direkt olämplig. Regulatorutgångens värde blir delvis beroende av förhistoriken och inte enbart av det senast mätta felet. Detta leder till problem vid handkörning och vid en ändring av regulatorförstärkningen  $K_p$  vid tiden  $t-n$ . Styrsignalen kan skrivas som

$$u(t) = K_{p2} [e(t) - e(t-n)] + K_{p1} [e(t-n-1) - e(0)] + \text{handkörningssignaler}$$

Istället skall den absoluta P-regulatoralgoritmen användas när så är möjligt, vilket dock inte går för en öka/minska utgång.

$$u(t) = K_p e(t)$$

Sambandet reglerfel och utsignal är nu helt entydigt. Detta är ytterst viktigt i samband med att ett ställdon skall öppna och stänga vid vissa reglerfel och i samband med sekvenser mellan olika ställdon.

### I-regulatorn

Här är också differansalgoritmen den bästa av samma skäl som för PI-regulatorn:

$$\Delta u(t) = K_I e(t)$$

### Regulator typer

Femton regulatoralgoritmer finns implementerade. För att beskriva dessa används beteckningarna  $y_1(t)$  för ärvärde,  $y_2(t)$  för börvärde,  $y_3(t)$  för extra ärvärde,  $u(t)$  för regulatorutsignal och  $e(t)$  för reglerfel  $y_1(t) - y_2(t)$ . Regulatorparametrarna anges med sina normala beteckningar P1, P2 och P3.

P-, D-, PD-, I-, PI- och differans-P-regulatorerna är standard, men inte PID-regulatorn. Skälen till detta är att D-parametern ofta inte används och att platsbehovet per regulator ökar. Algoritmen är följande:

$$\Delta u(t) = P1[e(t) - e(t-1) + e(t)/P2 + P3(y(t) - 2y(t-1) + y(t-2))]$$

Det ökade platsbehovet täcks med att lagra  $e(t-1)$ ,  $y(t-1)$  och  $y(t-2)$  efter regulatorns börvärde. Någon filtrering av derivatan görs ej. Den normala mätvärdesfiltreringen är likvärdig med detta.

Självinställande PI-regulatorer kan användas för att finna lämpliga regulatorparametrar till en PI-regulator med fixa parametrar. Regulatorerna kan också användas för att kontinuerligt reglera processer vars dynamik varierar så att en regulator med fixa parametrar ej kan användas. Två

modellparametrar till en första ordningens modell beräknas. En PI-regulator dimensioneras så att det slutna systemet erhåller en dubbelrot eller en enkelrot.

Kvotregulatorn beräknas med dynamikkompensering och relaxation enligt:

$$\tilde{u}(t) = P1 \tilde{u}(t-1) + (1-P1) u(t)$$

$$u(t) = P2 u(t-1) + (1-P2) \tilde{u}(t) y_2(t)/y_1(t)$$

I deltakvotregulatorn beräknas först förstärkningen enligt

$$g(t) = P1 g(t-1) + (1-P1) \Delta u(t-1) / \Delta y_1(t)$$

och därefter styrsignalen

$$\Delta u(t) = -g(t) e(t)$$

Simulering av dynamiska system sker med

$$u(t) = P1 u(t-1) + (1-P1)(P2 e(t) + P3)$$

Summering av olika variabler sker med

$$u(t) = P1 y_1(t) + P2 y_2(t) + P3 y_3(t)$$

eller

$$u(t) = P1 y_1(t) + P2 y_2(t) + P3 y_3(t) + u(t-1)$$

En regulator kan också ställas om för manuell styrning. Regulatorns utsignal följer då börvärdet. Analoga utgångar styr ut fullt i intervallet (0.0, 1.0). För öka/minska utgångar anger börvärdet en ändring relativt en gångtid på 60s. Ett börvärde på 0.1 kommer att köra ställdonet mot öka i 6s per reglerintervall. Vid kaskadreglering blir regulatorns utsignal lika med börvärdet.



## Utsignaltyper

Följande utsignaltyper finns:

Kaskadutgång	- ett är- eller börvärde
Integralutgång	- en öka/minska utgång
Pulslängdsmodulerad utgång	- en digital utgång
Analog utgång	- en strömutgång
Analog backuputgång	- en strömutgång
Stegutgång	- en följd av digitala utgångar

En backuputgång skiljer sig från en analog utgång genom att den utställda styrsignalen läses tillbaka. Detta är viktigt vid övergång från manuell eller backup-körning till datorkörning.

För att underlätta bestämning av reglerparametrar till olika regulatorer, antas att alla regulatorutsignaler ligger i intervallet (0.0, 1.0) utom kaskadutgången. Alla öka/minska ställdon antas ha en gångtid på 60 s.

## Tester

För att få en rimlig storlek på ett regulatorblock har testerna utformats så att ett av sju olika alternativ kan väljas.

Den första testparametern anger dödzone. Vid ett reglerfel mindre än dödzone sker ingen ändring av regulatorutsignalen.

Den andra testparametern anger ett flyttalspar, som anger den minsta och den största utsignaländring som tillåts. Små utsignaländringar kan nollställas, men detta är olämpligt. Stora utsignaländringar kan begränsas för att förhindra att styrsignalen går igenom hela sitt arbetsområde.

Den tredje parametern anger ett flyttalspar, som begränsar styrsignalen till ett intervall. Detta skall alltid användas vid kaskadregulatorer, då en eventuell integration sker i regulatorns utsignal.

### In- och utdata

Fyra parametrar anger in- och utdata till regulatorn och ordningsföljden är: ärvärde, som skall regleras, börvärde, som skall följas, extra ärvärde eller återläsning av backuputgång och sist utsignalen.

## 5. IMPLEMENTERING

### Uppbyggnad interpretator

Endast en grov bild av interpretatorns uppbyggnad skall göras. Interpretatorn har programmerats i assembler. Det finns tre huvudgrupper för operationer, vilka är logiska, flyttals- och omedelbara operationer. Likaså finns det tre sorters variabler eller operander nämligen logiska, heltals- och flyttalsvariabler.

Omedelbara operationer utföres så snart de påträffas. Subrutinanrop och olika hopp är några exempel på omedelbara instruktioner. När en logisk operation påträffas, lagras denna och en flagga sätts, som indikerar att en logisk operation skall utföras när nästa operand erhålls. Funktionen är densamma vid flyttalsoperationer.

När en logisk variabel påträffas, testas om logisk operation skall utföras eller om en logisk tilldelning skall utföras, annars lagras det inlästa värdet i den logiska ackumulatorn. Flyttalsvariabler behandlas analogt med logiska variabler. Heltalsvariabler delar tilldelningen med flyttalsvariablerna. Instruktionerna INVERT, IFIX och FLOAT simulerar en tilldelning efter sin normala operation.

Interpretatorn är egentligen flera interpretatorer - en för logiska variabler, en för heltalsvariabler och en för flyttalsvariabler - som alla arbetar helt oberoende av varandra. En omkastad ordningsföljd mellan en logisk operand och en flyttalsoperand leder ofta till samma resultat. I FIG 8.1 ges en grov flödesbild över interpretatorns uppbyggnad.

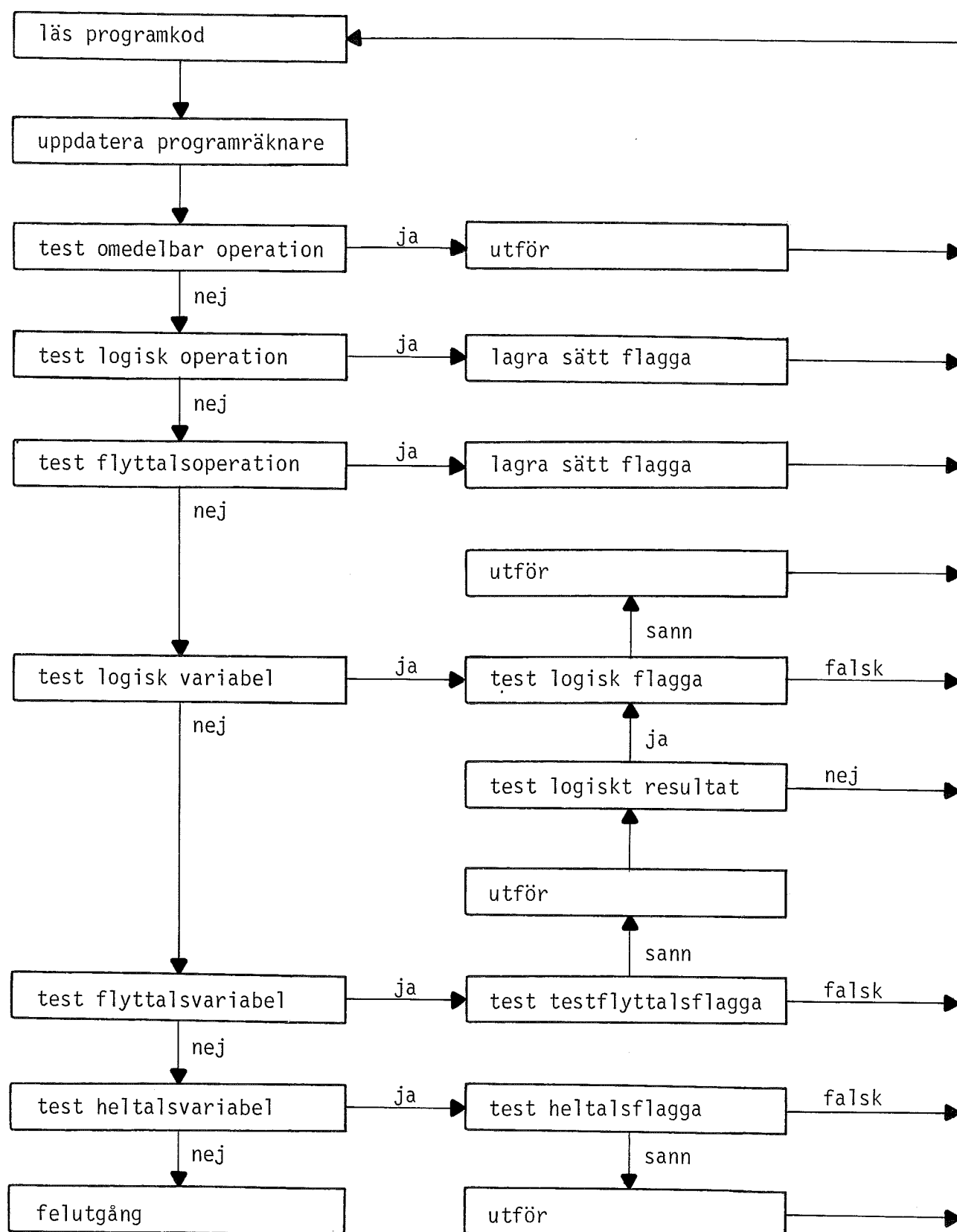


FIG 8.1 - Principskiss av interpretatorn för IPCL.

### Instruktionskod

Kravet på god packningstäthet löstes på så sätt att alla operanderna och de flesta operationerna definieras med en cell. I en operation utgör de nio sista bitarna en hoppinstruktion. Ett alternativ är att använda en pekare istället. Hoppmetoden tar mindre kod, är snabbare, tillåter otillåtna instruktioner och interpretatorn blir svår att ändra utan att instruktionskoden ändras. För pekarmetoden gäller motsatsen, dvs tar mer plats, är långsammare, tillåter endast tillåtna instruktioner och interpretatorn blir lättare att ändra.

I vissa interpretativa språk packas en operation och en operand i ett ord. För en dator med 16 bitars ordlängd kan 1-4095 in- och utgångar adresseras med 1+12 bitar och resterande 3 bitar kan användas för olika logiska operationer eller tilldelningar.

### Konvertering / kompilering

Konvertering av källkoden sker med ett program skrivet i EXTENDED ALGOL (Data General (1975b)). Subrutiner för strängbehandling ingår som standard. Konverteringen sker rad för rad. Källkoden genomlöps endast en gång.

### Assemblering / laddning

Assemblering sker med datortillverkarens normala assemblerprogram (Data General (1974a)) tillsammans med en fil, som innehåller alla definitionerna för de olika instruktionerna i IPCL. Felaktigheter såsom dubblerade lägen, utelämnade lägen, saknade definitioner och dubblerade definitioner påpekas. Laddningen av IPCL-programmet sker tillsammans med alla andra program och tabeller som skall ingå i det aktuella systemet.

## 6. OPERATÖRSKOMMANDO

För att enkelt kunna ändra ett IPCL-program on-line, har ett operatörs-kommando tagits fram. Generellt gäller att inmatning skall skrivas på samma sätt som utmatning, att interna adresser i IPCL-program anges oktalt och relativt IPCL-programmets början, att externa adresser anges absolut och att decimala heltal anges alltid utan decimalpunkt.

Efter själva kommandoordet IPCL anges den relativa programadressen, som skall undersökas. Utmatningen består av en rad med IPCL, angiven relativ adress, oktal kod, kod i klartext och eventuellt variabelvärde. Inmatning kan ske efter att utmatning skett. Hela uttryck kan skrivas på samma rad. För att visa sambandet mellan källkod, assemblerad kod och kod utskriven av kommandot IPCL, ges enkelt exempel nedan.

källkod

```
IN(3) AND IN(7) DON(10) OUT(2)
```

assembler kod

000001	100003	IN+3.
000002	040773	AND
000003	100007	IN+7.
000004	172012	DON+10.
000005	000000	0
000006	000002	OUT+2.

kommandot IPCL

IPCL	000001	100003	IN 3 0
IPCL	000002	040773	AND
IPCL	000003	100007	IN 7 0
IPCL	000004	172010	DON 10 0
IPCL	000006	000002	OUT 2 0

Antag att uttrycket ovan skall ändras till

```
IN(4) OR IN(5) SET OUT(6)
```

Operatören skriver då efter att ha slagit kommandot

>IPCL 1

IPCL 000001 100003 IN 3 0 IN 4 OR IN 5 NET OUT 6 NOP

För att kunna ändra i ett IPCL-program krävs det att listan som produceras efter assembleringen finns tillgänglig. Denna innehåller både källkod, som kommentarer, och den utlagda koden. Endast ändringar och strykningar kan klaras av. Detta innebär att tillägg endast kan utföras när det finns lediga celler.

Det är i och för sig möjligt att tillåta utökning av koden och därmed flyttning av nedanförliggande kod, om plats finns tillgänglig i slutet av programmet. De instruktioner, som innehåller adresser, måste eventuellt modifieras. Nackdelen är att programlistan inte gäller för kod och adresser till kod nedanför den gjorda ändringen.

För att kunna ändra IPCL-koden i datorn, måste operatören känna till antalet ord per instruktion. Alla logiska, alla flyttals- och flertalet omedelbara instruktioner är enkelordsinstruktioner. De skrivs ut på samma sätt som i källkoden. Ett undantag är synonyma instruktioner, t ex CLOSE anges som STOP.

Dubbelordsinstruktioner är fördröjningssatserna, hoppSATserna, assembler-subrutinanrop och tidspulsinstruktionerna.

Trippelordsinstruktionerna är det normala subrutinanropet, underprogram-anropet och väntesatsen.

Förutom grundkommandot IPCL finns det fyra andra hjälpkommandon: PRINT, SEEK, STEP och TEST. Med PRINT kan en angiven programdel skrivas ut. Med SEEK erhålls utskrift av alla instruktioner som är identiska med den angivna i det angivna området. Stegvis exekvering av ett IPCL-program kan ske med kommandot STEP. Stegning sker genom att slå en linefeed. Flera steg kan tas i en följd genom att ange antalet steg före linefeed. Utskriften är utökad med de tre ackumulatorernas värde. Svårare programmeringsfel kan redas ut med detta kommando. Kommandot TEST motsvarar

grundkommandot kompletterat med möjlighet att ändra variabelvärden. Uttestning kan göras effektivare, eftersom byte av operatörskommando ej behöver ske för att ändra ett variabelvärde.

## 7. REFERENSER

Data General, 1974a: Extended Assembler. User's Manual. 093-000040-01.

Data General, 1974b: Fortran 5. User's Manual. 093-000085-03.

Data General, 1975a: Introduction to the Real Operating Time System.  
093-000093-02.

Data General, 1975b: Extended Algol. User's Manual. 09-000052-05.

Data General, 1975c: Extended Basic. User's Manual. 093-000065-06.

Jensen, Lars, 1976: Reglering med DDC-6. Tour och Andersson.

Jensen, Lars, 1977a: IPCL ett interpretativt processtyrningsspråk.  
Tour och Andersson.

Jensen, Lars, 1977b: IPCL.LB ett subrutinbibliotek. Tour och Andersson.

Tour och Andersson, 1977: List of References.

## APPENDIX A

SYNTAX FOR IPCL

<digit>::=1|2|3|4|5|6|7|8|9|0

<letter>::=A|B|C|D|E|F|G|H|I|J|K|L|M|N|O|P|Q|R|S|T|U|V|X|Y|Z

<integer>::=[<digit>]\*

<identifier>::=<letter>[<digit>|<letter>]\*

<label>::=<integer>|<identifier>

<fixed variable>::=IN(<index>)|OUT(<index>)|TCM(<index>)|NUM(<index>)|  
 IC(<index>)|AIN(<index>)|AOUT(<index>)|IOUT(<index>)|  
 MV(<index>)|SV(<index>)|PV(<index>)|RC(<index>)|REG(<index>)|  
 <identifier>

<comment statement>::=C<any character string>

<definition statement>::=D           <identifier>=<fixed variable>

<assembler statement>::=ASMON  
                           [A<assembler code>]\*  
                           ASMOFF

<loopindex>::=I|J|K

<index>::=<integer>|NUM(<integer>)|<loopindex>

<logical operation>::=AND|NAND|OR|NOR|EQ|NE|FAT|TAF|FOT|TOF

<logical variable>::=IN(<index>)|OUT(<index>)|ARG(<index>)

<logical primary>::=TRUE|FALSE|  
                           [NOT][<logical variable>|<relation>|  
                           TCM(<index>)|TIME(<integer>,<integer>)]<sup>1</sup>

<logical expression>::=<logical primary>[<logical operation>  
                           <logical primary>]\*

<logical assignment operation>::=SET|NET|  
                           DOFF(<index>)|DOFFON(<index>)|DON(<index>)

<logical init operation>::=START|STOP|OPEN|CLOSE|ONE|ZERO|  
                           ISTART|ISTOP|IOPEN|ICLOSE

<logical statement>::=<logical expression>  
                           [<logical assignment operation><logical variable>]\*|  
                           [<logical init operation><logical variable>]\*



<integer variable>::=<loopindex>|NUM(<index>)|AIN(<index>)|  
                           AOUT(<index>)|IOUT(<index>)|ARG(<index>)  
 <integer primary>::=<integer variable>|IC(<index>)  
 <integer assignment operation>::=INVERT|=  
 <integer init operation>::=MAXA|MINA|MAXI|MINI  
 <integer statement>::=<integer primary>  
                           [<integer assignment operation><integer variable>]\*|  
                           [<real expression>IFIX<integer variable>]\*|  
                           MAXAOUT(<index>)|MINAOUT(<index>)|MAXIOUT(<index>)|MINIOUT(<index>)|  
                           [<integer init operation><integer variable>]\*  
 <real variable>::=MV(<index>)|SV(<index>)|PV(<index>)|ARG(<index>)  
 <real primary>::=<real variable>|RC(<index>)  
 <real operation>::=\*/|+|-|MAX|MIN|\*\*  
 <real function>::=ALG|EXP|COS|SIN|TAN|ATN|SQR|ARS|NABS  
 <real function expression>::=<real function>(<real primary>)  
 <real expression>::=<real primary>[<real operation><real primary>]\*|  
                           <real function expression>[<real operation><real primary>]\*  
 <real statement>::=<real expression>[=<real variable>]\*|  
                           <integer primary>FLOAT<real variable>  
 <relation operation>::=RGE|RGT|RLE|RLT|REQ|RNE  
 <relation>::=<real expression><relation operation><real primary>  
 <regulator statement>::=REG(<index>)  
 <goto statement>::=GOTO <label>|  
                           IF <logical expression> GOTO <label>|  
                           IF <logical expression> NOGOTO <label>  
 <if-then-else statement>::=IF <logical expression> THEN  
                           <statement>[ ELSE <statement>] IFEND  
 <matrix element>::=<fixed variable>(<number of rows>,<row number>,<column number>)  
                           <number of rows>::=<index>  
                           <row number>::=<index>  
                           <column number>::=<index>  
 <loop statement>::=FOR <loopindex>=<index>,<index>  
                           [<statement>]\*  
                           NEXT <loopindex>  
 <subroutine call >::=CALL <label>  
                           (<number of arguments>[,<fixed variable>]\*)

<number of arguments>::=<integer>

<statement>::=[<comment statement>|  
                   <definition statement>|  
                   <logical statement>|  
                   <integer statement>|  
                   <real statement>|  
                   <goto statement>|  
                   <if-then-else statement>|  
                   <loop statement>|  
                   <subroutine call>|  
                   <regulator statement>|  
                   <assembler statement>]\*

<subroutine>::=SUBROUTINE <label>  
                   [<statement>|RETURN]\*RETURN

<subprogram>::=PROGRAM <label>[<statement>|  
                   WAIT(<integer>)|WAITFOR(<logical variable>)|  
                   SYNC(<integer>,<integer>)|EXIT]\*EXIT

<program>::=[<statement>|<subprogram call>|END]\*END  
                   [<subprogram>|<subroutine>]\*

## ENGLISH SUMMARY

### BACKGROUND

The need for climate control has increased rapidly since the 1960's. One reason is new building techniques with light constructions having large internal heat loads from lighting, machines, people and sun radiation through large windows. The increased heat loads can be coped with by several types of climate systems. These systems need some type of control.

The demand for better control has increased further owing to the rising energy prices. Many plants are therefore equipped with some type of heat recovery. This makes the systems more complicated.

Climate control technology has for a long time been regarded as under-developed. The main reason for this is the cost constraints. A control system should primarily be cheap. Technical performance has been considered as being of less importance. The operating costs have also often been disregarded when choosing a climate system.

The demand for efficient supervision of large buildings has now increased owing to the high labour costs. Today there are a number of supervisory systems. Many systems are based on micro- and minicomputers. They are usually combined with normal control hardware. A new phase of development will be to replace the conventional controllers with digital computers.

There is seldom any coordination between different controllers in climate control systems. Such a coordination is difficult to perform with conventional technology. It can, however, be achieved based on knowledge of process dynamics and only a moderate extension of the software in a computer system.

Adjustments of controllers are expensive because climate processes are slow. There are normally no aids like recorders when adjustments are made.

This gives an incentive to simplify the controllers, so that only a small number of adjustments are needed. Computer control technology gives a new possibility to adjust parameters in control algorithms automatically.

So far, computer technology has been used mainly for static design of climate systems. Simulations of room air temperature are carried out in some cases. Different building elements such as floors, walls, and ceilings are well defined in such simulations. The climate system with its control equipment is, however, often simplified.

## THE RESEARCH PROJECT

A research project was started in 1970 with the background mentioned above. The project was supported by the Swedish Council for Building Research. The main tasks of the project were to develop process knowledge, to build mathematical models, and to carry out control experiments with climate processes. The project was focused on digital control.

## CONTENTS OF THESIS

This thesis consists mainly of results from the research work. A small part has been obtained when working with computer systems for control and supervision of climate systems. Many experiments have been made with different components and climate systems. The total experiment time covers about 1500 hours. A portable process interface has been used to connect the processes to a stationary computer either via the telephone network or via a local cable. Programs have been developed to perform fully automated experiments. The experimental equipment is described in Chapter 3.

Simple theoretical models are obtained from mass and energy balance equations. It is shown how unknown or uncertain model parameters can be identified using measurements from the process. The advantage of models based on physical equations is that the influence of changes in different

model parameters is easy to investigate. The methods used to obtain the mathematical models are discussed in Chapter 4.

In Chapter 5 several different climate processes such as rooms, air ducts, heat exchangers, and buildings are modelled. Simple theoretical models are compared with experimental ones. The results show that the correspondence is rather crude. The main problem is to obtain values of certain physical parameters like heat transfer coefficients. The results show that it is easy to determine experimental models for climate processes. Models of first or second order are often satisfactory.

Methods used to design regulators are presented in Chapter 6. A properly adjusted PI-regulator can be used in many cases. It can, however, be difficult to adjust a regulator properly because the process dynamics may vary with the operating conditions. The main thrust of the work has been to investigate simple self-tuning regulators. A new adaptive regulator called the quotient regulator has been developed. The regulator can be written as

$$u(t) = u(t-1) y_r / y(t), \quad u(t) > 0, y_r > 0, \text{ and } y(t) > 0.$$

This regulator has no steady state error and can be looked upon as an I-regulator with variable gain. The regulator can be used to control static nonlinear processes described by

$$y(t+1) = f(u(t))$$

if the function  $f(u)$  fulfils the inequality

$$0 < f'(u) < 2f(u) / u, \quad u > 0.$$

A large group of processes can be controlled if the quotient regulator is modified with damping. The regulator can also control linear dynamic processes. Conditions for local and global stability are shown for some types of transfer functions. The sampling interval is an important design parameter for the quotient regulator. The sampling interval should be chosen, so that more than half the step response is obtained after one sampling period. This may lead to long sampling intervals. A shorter sampling interval can be used if dynamic compensation is applied.

Choice of suitable control principles is also discussed. The idea is to avoid difficult control problems by a suitable choice of measured, controlled, and computed variables. The calculations needed are easy to carry out if a computer is used to control the process. The chosen variables also turn out to be very informative compared with the variables normally used.

Several control experiments with different climate processes are described in Chapter 7. In most cases each climate process has been tested without control, with normal control, and with different digital regulators. Each test has contained some kind of disturbance or setpoint change.

Experiments with a room heated with electrical radiators showed that a PI-regulator gives a good result. Only small improvements could be achieved with more complex regulators.

The normal temperature control of a block of flats was improved in another case. The normal control with only feedforward was expanded with feedback from the exhaust air temperature. This is nothing remarkable from the control point of view, but the energy-saving is substantial. The increased installation cost is repaid in one to two years.

On-off control of a ventilated room is in one case improved by using a deadbeat regulator. In another case a room air temperature control was modified with good result. The normal heating using bypass was replaced by pulse modulation of the water flow through the heat exchanger. This modification is also preferable from an energy point of view because there are no heat losses when the flow is zero.

The quotient regulator is used in two cases to control the inlet air temperature with an electric air heater and a heat pump. The heat pump could only be controlled in eight steps. If a PI-regulator is used, there will be a continuous switching on and off of one step. This does not occur when the quotient regulator is used.

An enthalpy heat exchanger is controlled by a self-tuning regulator based on the principle of controlling the efficiency.

An efficient programming method is necessary to be able to implement the new ideas that are presented in the thesis. It is not possible to use a standard program to manage all cases because such a solution leads to a poor utilization of the computer memory.

A high level programming language has to be used. Such a process control language is described in Chapter 8. The language has been implemented on more than ten computer control systems with good results. The language is interpretative and it is therefore easy to make changes on-line. Another advantage is the efficient memory utilization in comparison with ALGOL, BASIC, and FORTRAN.