

FRÅNLUFTSTEMPERATURREGLERING AV FLER-  
FAMILJSHUS

JAKOB APELBLAT  
PER RYDSTRÖM

Institutionen för Reglerteknik  
Lunds Tekniska Högskola  
December 1977

## FRANLUFTSTEMPERATURREGLERING AV FLERFAMILJSHUS

Jakob Apelblat

Per Rydström

---

Denna rapport avser anslag 740622-5 från Statens råd för Byggnadsforskning till institutionerna för Byggnadskonstruktionslära och Reglerteknik vid Lunds Tekniska Högskola, Lund.

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	Inledning och problemställning	1
2	Flerfamiljshuset och dess temperaturreglering	5
3	Experimentuppställning	10
4	Identifieringsexperiment	14
5	Identifiering av husets dynamik	20
6	Regulatorbestämning	29
7	Datorreglering av frånluftstemperaturen	40
8	Slutsatser	48
9	Referenser	50

## BILAGOR

## 1 INLEDNING

Avsikten med detta arbete har varit att undersöka möjligheterna att temperaturreglera ett flerfamiljshus med frånluftstemperaturen. Frånluften är ventilationsluften från kök, badrum och wc. Vid konventionell reglering reglerar man vattentemperaturen i radiatorsystemet efter utetemperaturen, en s k framkoppling. Genom att även reglera efter frånluftstemperaturen, får man en återkoppling och bör på så sätt få en bättre temperaturreglering, om frånluftstemperaturen motsvarar rumsluftstemperaturer.

I denna rapport behandlas hur en i tiden varierande frånluftstemperatur skall kunna regleras till ett konstant värde. Detta skall inte förväxlas med problemet med temperaturskillnaden mellan olika lägenheter eller rum i samma hus. Dessa temperaturvariationer kan endast rättas till genom att inreglera radiatorsystemet.

I FIG.1.1 ges en principskiss över det nuvarande reglersättet och det reglersätt som har provats i detta arbete.

Med en bättre temperaturreglering så kan temperaturvariationerna minska och en lägre medeltemperatur kan användas utan att rumslufttemperaturen blir för låg. Med dagens reglering förekommer det temperaturvariation på en grad eller mer. 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 en sänkning av medeltemperaturen blir då  $200 \cdot 1 \cdot 1/2 = 100$  graddagar dvs en besparing på några procent. En eldningssäsong motsvarar 3000 - 4000 graddagar och omfattar 200 dagar.

I ett dåligt eller icke inreglerat flerfamiljshus så kan det bli stora temperaturskillnader mellan olika lägenheter och även mellan olika rum i samma lägenhet. För att hålla den kallaste lägenheten på en rimlig temperatur, så medför detta övertemperatur i alla andra lägenheter och rum.

Den onödiga uppvärmningen kan enkelt uppskattas om medeltemperaturen

ligger en grad över den önskade temperaturen. Meruppvärmningen blir antalet eldningsdagar 200 dagar gånger en grad, dvs 200 graddagar, vilket är av samma storleksordning som en bättre reglering ger.

Eftersom antalet fastigheter med konventionell reglering är ytterst stort, så kan även en liten förbättring innebära en stor total besparing. Det är därför av intresse att känna till antalet flerfamiljshus i Sverige, deras ålder, storlek, uppvärmningstyp etc. Vi vände oss därför till följande statliga myndigheter för att få upplysningar; Statens Planverk, Statistiska centralbyrån, Folk- och bostadsräkningen, Centralnämnden för fastighetsdata och Riksskatteverket. Ingen av de nämnda myndigheterna kunde hjälpa oss. Det visade sig att den statistik som fördes gällde lägenheter och inte fastigheter. I BILAGA 1.1 redovisas det material som erhöles från Statens Planverk (1976).

Det finns 2 005 000 lägenheter i flerbostadshus och 1 151 000 lägenheter i småhus med vattenburen värme. Dessa lägenheter i flerbostadshus förbrukar ca 24 TWh för uppvärmning och till en kostnad av ca 2400 milj kr, om man antar att priset per kWh är 10 öre. Motsvarande siffror för småhus är 23 TWh resp 2300 milj kr.

Man kan anta att antalet lägenheter per flerbostadshus är 20. Detta skulle innebära att det finns över 100 000 flerbostadshus med vattenburen värme. Man kan dessutom anta att ca 60% av alla flerbostadshus och ca 20% av enbostadshusen har utetemperaturstyrd automatisk shuntutrustning. Det finns således mer än 60 000 flerbostadshus vars reglering kan förbättras. Beträffande småhusen är det svårare att göra en uppskattning, då en del av dessa har någon form av återkoppling av innetemperaturen i sin reglering. Det bör än en gång betonas att vi har utgått från ett mycket ofullständigt material, därför bör ovanstående siffror ses som grova uppskattningar.

Varje flerbostadshus behöver ej nödvändigtvis ha var sin reglercentral utan i regel så finns reglercentral i en panncentral eller i en undercentral, som försörjer en grupp av hus.

I avsnitt 2 beskrivs det aktuella flerfamiljshuset och dess temperaturreglering, som är den helt dominerande idag. Den mycket avancerade ut-

rustning som användes vid experimenten presenteras kortfattat i avsnitt 3. Hur upptagandet av mätdata för identifiering av bostadshusets dynamik skedde beskrivs i avsnitt 4. I avsnitten 5 och 6 redogörs för identifieringen av husets dynamik resp några simuleringsförsök att temperaturreglera huset med olika regulatorer. De regulatorer som togs fram vid simuleringen prövades sedan i fullskaleexperiment, som beskrivs i avsnitt 7. Slutligen ges en sammanfattning av de funna resultaten och några förslag till uppföljning av examensarbetet i avsnitt 8.

Arbetet har till största delen utförts under våren 1977 som ett examensarbete vid institutionen för Reglerteknik vid LTH. Lars Jensen har varit ansvarig handledare och examensarbetarna har varit Jakob Apelblat och Per Rydström. Vi använde institutionens dator för att analysera och reglera ett hus beläget i Malmö. Detta hus studeras även i ett annat byggforskningsprojekt (anslag 750212-0).

Arbetet skedde till stor del med datorn och datortiden fördelade sig på följande sätt:

upplärning, förberedelser	22 tim
identifieringsexperiment, 2 st	46 tim
identifiering	4 tim
simulering	4 tim
reglerexperiment, 6 st	143 tim
totalt	227 tim

Vid vårt arbete hade vi stor hjälp av följande personer, till vilka vi vill rikta ett varmt tack.

Ingenjör Egon Lange vid institutionen för Byggnadskonstruktionslära som med sitt stora praktiska kunnande har varit till oumbärlig hjälp. Reglertekniska institutionens personal som alla har varit mycket hjälpsamma och intresserade i synnerhet ingenjör Rolf Braun och forskningsingenjör Leif Andersson.

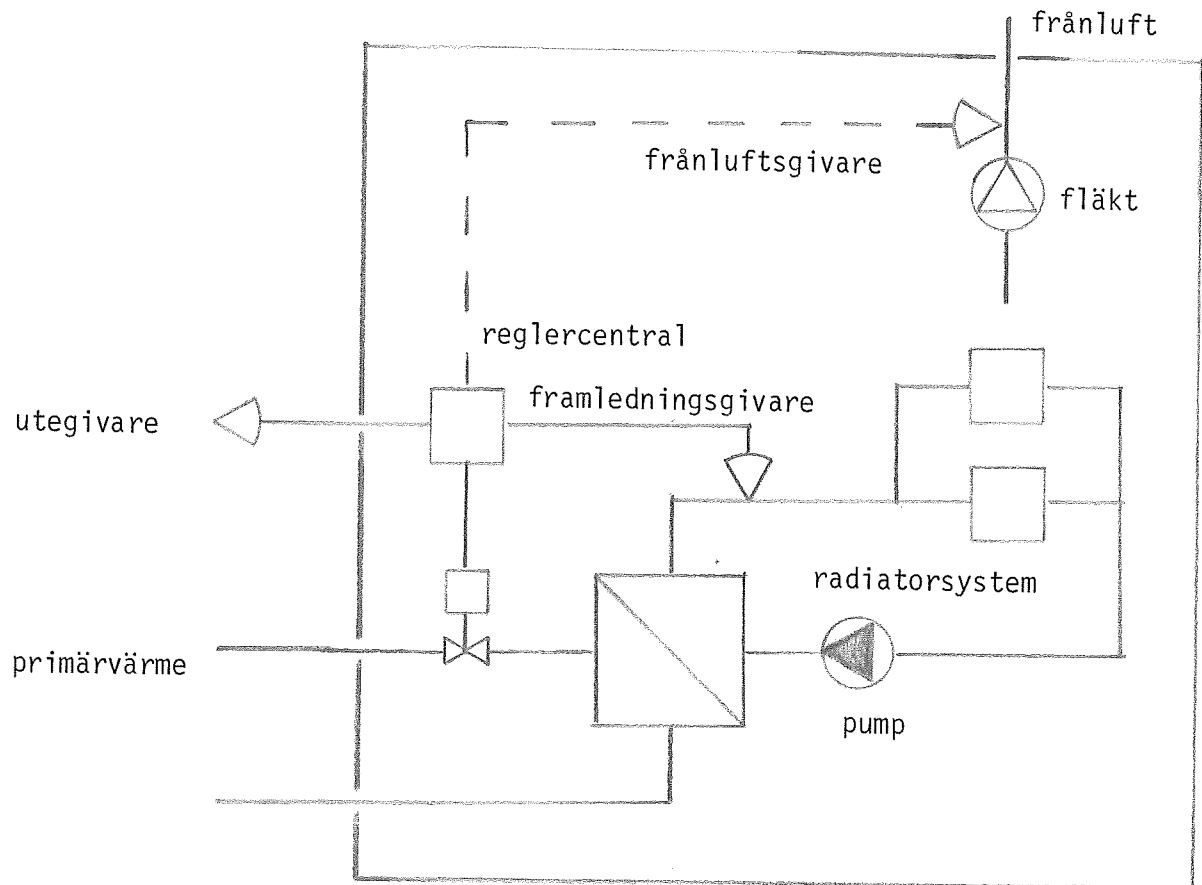


FIG.1.1 Principskiss för temperaturreglering av flerbostadshus. Frånluftsgivaren är den enda yttre skillnaden mellan det nuvarande reglersättet och det nya reglersätt som provats.

## 2 FLERFAMILJSHUSET OCH DESS TEMPERATURREGLERING

### Flerfamiljshuset

Huset som vi utförde våra experiment på är beläget i kvarteret Teknikern i Malmö. Detta hus studeras av samarbetsgruppen för byggnaders energiförsörjning med anslag från Statens råd för byggnadsforskning. Detta var en stor fördel då vi i viss mån kunde utnyttja redan befintlig mätapparat och kablar.

Huset är ett åttavånings flerfamiljshus, orienterat i nord-sydlig riktning, med källare och totalt 72 lägenheter. Huset är utförligt beskrivet i Lange (1976).

Lägenheterna ventileras med mekanisk frånluft. Från kontrollventiler i bad, wc och kök är vertikala samlingskanaler dragna i trapphuset upp till en i varje trapphus placerad frånluftsfläkt. Samtliga kanaler på våningsplan och samlingskanaler till fläktrum är av plåt. Antalet luftväxlingar är 0.75 per timme.

Fastigheten förses med fjärrvärme från Malmö kraftvärmeverk. I värme-centralen, belägen i källarplanet växlas vattnet i en prefabricerad abonnentcentral med separata plattvärmeväxlare för radiatorvatten, tappvarmvatten samt hetvatten till varmluftsfläktar i torkrummen. Abonnentcentralen beskrivs i BILAGA 2.1.

Radiatorsystemet har en dim.temp. sekundärsida 80-60 °C, flöde 18.5 m<sup>3</sup>/h och effekt 320 Mcal/h. Radiatorsystemet är i källarplan tvårörs och i övriga huset ettrörssystem.

### Nuvarande temperaturreglering av flerfamiljshus

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 mm.



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

I stationärt tillstånd är uppvärmningsbehovet i stort sett proportionellt mot temperaturskillnaden inne-ute. Vid temperaturreglering i de flesta flerfamiljshus med vattenburen värme utnyttjas detta faktum. 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. Detta är den vanligast förekommande typen av reglering.

Egenskaperna kan sammanfattas med nackdelarna

- tar ej hänsyn till sol  
vind  
personer  
el apparater
- övertemperatur vädras bort
- kurvan svår att ställa in
- undertemperatur "klagas rätt"
- ingen återkoppling från innetemperatur

och fördelarna

- utetemperaturberoende lastvariationer
- varma radiatorer
- enkel reglerprincip
- billig

Ett mer avancerat reglersystem kan fås om man även kompenserar för vindhastigheten och solintensiteten. Detta sker genom att använda speciella givare. Om detta är en för- eller nackdel beror på hur väl man kan ställa in sol- och vindfaktorerna på reglercentralen. Ett problem är också att byggnaden påverkas inte på ett så enkelt sätt som man kan mäta med de speciella givarna. Se för övrigt Madsen.

## Frånluftsreglering

Då man avser att temperaturreglera ett hus med frånluftstemperaturen, ställer man sig osökt frågan, hur pass väl överensstämmer frånluftstemperaturen med husets verkliga innetemperatur. En klar fördel härvidlag är, som i vårt fall, att frånluftskanalerna är av plåt. Till skillnad från kanaler i betong är plåtkanaler täta och har en snabb temperaturdynamik. Frånluftstemperaturen ger även ett relativt bra och lättmätt medelvärde av temperaturen i samtliga lägenheter. Ett problem är dock att morgon- och kvällssol påverkar temperaturen i lägenheterna högst olika. Det kan lätt hända att lägenheter belägna på skuggsidan blir för kalla om man reglerar efter frånluftstemperaturen. I det aktuella huset så är 56 av 72 lägenheter genomgående. Ett annat problem är att aktiviteter i kök och badrum påverkar frånluftstemperaturen mer än i övriga rum. Det är därför viktigt att frånluftsventilationen är väl tilltagen. I vårt fall 0.75 luftväxlingar per timme.

FIG.2.1 visar medeltemperaturen från 4 st frånluftsgivare från det flerfamiljshus som vi skulle undersöka. Detta hus reglerades enligt det ovan beskrivna reglersystemet. Man kan misstänka att regleringen är betydligt sämre än vad som framgår av figuren. Antagligen reducerar de boende genom vädring alltför höga inomhustemperaturer.

Egenskaperna för frånluftsregleringen kan redovisas med fördelarna

- sparar energi
- konstant temperatur - bättre komfort
- rätt nattsänkning

och nackdelarna

- hög mätnoggrannhet
- frånluft = rumsluft?
- ökat slitage
- hängningsrisk
- suboptimering - hetvattencentral/kraftvärmeverk
- ökad installationskostnad

Med hängningsrisk avses här möjligheten att vid vädring så sjunker frånluftstemperaturen varvid framledningstemperaturen ökas och vädringen ökar och så vidare. Slutresultatet skulle då bli att uppvärmning och vädring var maximal och att frånluftstemperaturen skulle vara för låg. Detta inträffar bara när den önskade frånluftstemperaturen är för hög.



### 3 EXPERIMENTUPPSTÄLLNING

#### Datorn

Vid experimenten användes institutionen för Reglertekniks dator PDP-15. Den har ett kärnminne på 32 K och ett skivminne på 256 K ord. Vi arbetade med reeltidssystemet RSX-15 PLUS, som beskrivs i Leden (1974).

#### Mät- och styrutrustning

För att kunna mäta och styra så användes en coupler/controller system av fabrikat Hewlett Packard 2570A. Några prestanda för systemet är

analoga ingångar	10
analoga utgångar	4 alt 0
logiska utgångar	4 alt 16

Till de analoga ingångarna kan följande temperaturgivare anslutas

5 st 15-35 °C	noggrannhet ±0.06 °C
5 st 0-100 °C	noggrannhet ±0.2 °C

För att kunna styra effektkrävande utrustning, så har systemet utökats med en effektrelelåda ansluten till de 16 digitala utgångarna. Relälådan har 20 två-poliga reläer, varav 1-16 styrs av systemet. Relä 17-20 är hjälpreläer.

Systemet styrs av en dator och kommunikationen sker som om systemet vore en teletype. Detta medför att mät hastigheten blir låg. En mätvärdesavläsning tar 2.6 s och en utställning av 16 reläer tar 0.7 s. Datoröverföringen sker via kabel på kortare avstånd upptill 1 km och via telefonnätet på längre avstånd.

Ytterligare detaljer om systemet återfinns i Hewlett Packard (1971) och Jensen (1973).

Mätutrustningen placerades i ett speciellt inrett källarrum i mäthuset.

Kommunikationen mellan mät- och styrutrustningen placerad i Malmö och datorn placerad i Lund sköttes av två av televerkets modem placerade på respektive orter. Detta visade sig vara mycket bekvämt, då vi på så sätt helt kunde sköta experimenten från den i Lund befintliga datorn.

### Mätpunkter

Följande temperaturmätpunkter och givare användes

Mätpunkt	Givaretyp
Frånluft 1	15 - 35 °C
Frånluft 2	15 - 35 °C
Frånluft 3	15 - 35 °C
Frånluft 4	15 - 35 °C
Mätutrustningsrum	15 - 35 °C
Radiator tillopp	0 - 100 °C
Radiator retur	0 - 100 °C
Utetemperatur	0 - 100 °C

Temperaturgivarna för frånluften placerades ovanför var och en av de fyra frånluftsfläktarna. Vi utnyttjade en redan befintlig isolerad dubbelledare för ledningsdragningar mellan temperaturgivarna i vindsplanet och mätutrustningen placerad i källarplanet.

Vi befarade att elektriska störningar från nätet skulle upptas av de långa oskärmade ledningarna och störa mätningarna. Det visade sig emellertid att digitalvoltmeterns inbyggda filter helt eliminerade dessa störningar.

Vi mätte upp resistansen hos ledningarna till frånluftsgivarna till omkring 5 ohm. Denna resistans skall jämföras med resistansändring per grad vid 25 grader som är 200 ohm per grad. Denna extra resistans i mätbryggan ger alltså upphov till ett systematiskt mätfel på omkring 0.025 grader, vilket är mindre än den angivna noggrannheten hos givaren ( $\pm 0.06$  grader).

Temperaturgivarna för radiatortillopp och retur tejpades direkt på res-

pektive ledningar i värmecentralen. Därefter lades den ordinarie värmeisoleringen tillbaka. Som värmeledande medium mellan metallröret och temperaturgivarna använde vi ett värmehärdigt silikonfett.

Då temperaturgivarna placerades på utsidan av röret befarade vi att de skulle visa ett för lågt värde. En teoretisk beräkning med ungefärliga värden visade att mätfel blev mindre än  $0.1^{\circ}\text{C}$ . I praktiken visar det sig att mätfelet kan uppgå till några grader beroende på utförandet. Ett mätfel av den storleksordningen har ingen betydelse för den typ av experiment som skall utföras.

Utetemperaturgivaren placerades på norrgaveln. En givare placerades i mättrummet för kontroll av systemet.

### Reläkopplingar

För att kunna fjärreglera radiatorventilen så krävdes följande

- omkoppling mellan normal- och datorreglering
- fjärrkörning av ställdon öka/minska
- förhindrande av samtidig öka och minska-körning av ställdonet
- automatisk återinkoppling av normalreglering vid datorbortfall
- normalreglering vid strömlös mätutrustning

Ställdonet är av öka/minska typ och detta innebär att en kontaktslutning får ställdonet att öka med konstant hastighet och en annan kontakt ger upphov till motsatsen.

Dessa uppgifter kunde lösas med några enkla reläkopplingar med de tvåpoliga reläer som är anslutna till de digitala utgångarna. I FIG.3.1 återges den utförda reläkopplingen.

Den automatiska återgången till normalreglering löstes genom att konstruera en digital klocka. Vid varje samplingsintervall sluts nämligen en extra digitalutgång i form av ett relä under 3 ms. Om fel hos datorn eller i dataöverföringen skulle uppstå uteblir dessa kontaktslutningar. Om alarmklockan inte har noterat en kontaktslutning inom en inställbar tid

mellan 20 sek och 20 min, så ger den alarm genom att bryta relä 3, vilket medför en övergång till normal reglering.

Övergång till normal reglering sker givetvis när man glömmar bort att återställa efter avslutat experiment. Den automatiska återgången till normal reglering var ytterst viktigt eftersom experimenten skulle köras helt obemannade en stor del av försökstiden.

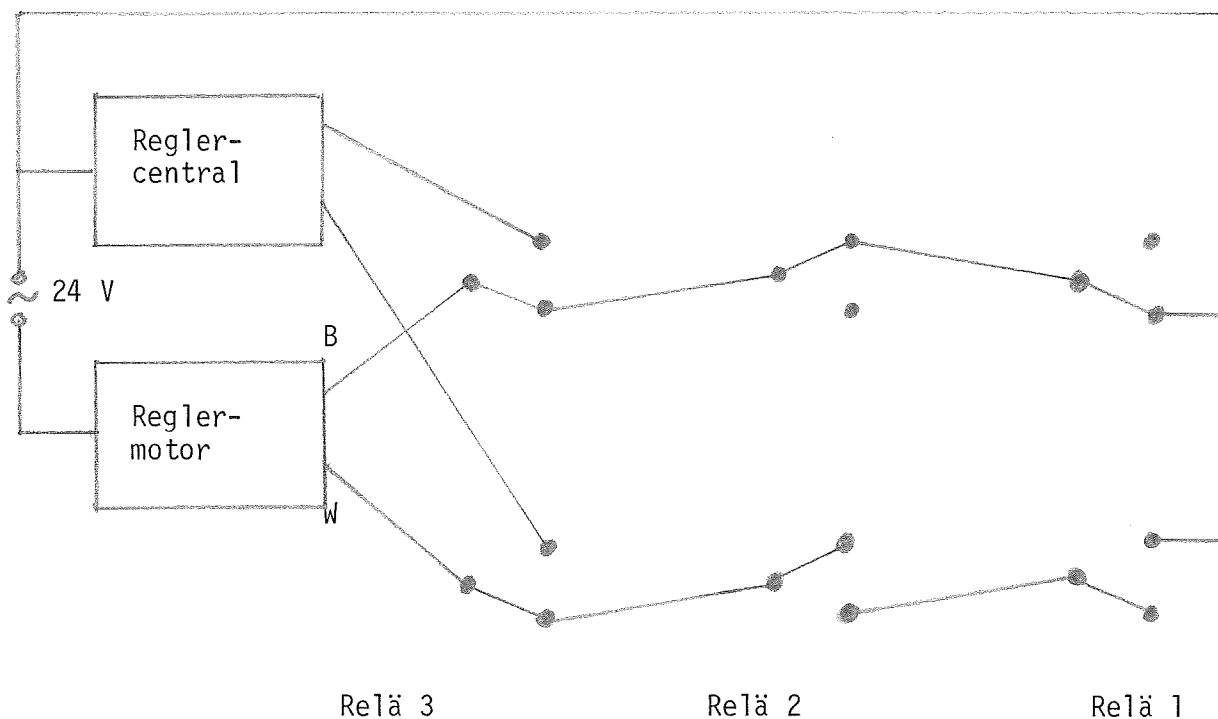


FIG.3.1 Figuren visar relälägena då reglermotorn ökar vid datorreglering.

Relä 1 öka

Relä 2 minska

Relä 3 dator/normal



#### 4 IDENTIFIERINGSEXPERIMENT

Avsikten med experimenten var att insamla mätdata så att en modell kunde bestämmas för det system som skulle regleras. Modellen skulle sedan kunna användas vid simulering av olika regulatorer. Frånluftstemperaturen skulle regleras genom att variera radiator-tilloppstemperaturen. Modellen skulle därför beskriva detta sambandet mellan frånluftstemperatur och radiator-tilloppstemperatur. Mätdata skulle alltså omfatta minst dessa två variabler.

Mätningen startade fredag kväll klockan 9, och höll på till söndag eftermiddag klockan 4. Då datorn inte hade plats att lagra alla mätdata på skivminnet efter varandra, så delades experimentet upp i två delar: fredag kväll klockan 9 till lördag kväll klockan 6, och lördag kväll klockan 6 till söndag eftermiddag klockan 4. När första delen av experimentet gjorts, så fördes dessa data över från skivminnet till en Dec-tape, varefter skivminnet tömdes, och experimentet fortsatte. Bilder togs också här av data från den första delen av experimentet. När hela experimentet var färdigt fördes data från andra delen av experimentet över till Dec-tape, och bilder togs av dessa data, dessa bilder finns i FIG.4.1 - 4.3.

Fem olika datorprogram kördes samtidigt vid identifieringsexperimentet och deras namn och uppgifter var följande:

NCCIO	mäta och ställa ut reläer
LOGGA	logga mätdata
CCPMO	pulslängdsmodulera reläutgång
REGLE	reglera
REGLA	programstyra

I Jensen (1974) beskrivs de program som användes vid experimenten.

Vid varje hel minut gick NCCIO ut och gav order till Coupler/Controllern att mäta de åtta temperaturvärdena och sända iväg dem till datorn, detta tar 20-25 sekunder. Sedan gick REGLE in, och beräknade, på grundval av temperaturer (radiator-in) och dess börvärde, en styrsignal till radiatorventilmotorn. Denna styrsignal ställdes sedan ut av CCPMO, på så sätt att

ett relä hölls slutet och gav motorn ström i så många sekunder och åt det håll (+,-), som REGLE angivit. Gångtiden för ventilmotorn mellan ändlägena var 300s. Därefter gick REGLA för att eventuellt ändra börvärdet på radiator-in-temperaturen. Slutligen gick LOGGA in och skrev ut de data på skivminnet som vi hade begärt skulle loggas, nämligen de åtta temperaturerna plus börvärdet till radiator-in-temperaturen.

För att kunna bestämma ett dynamiskt samband mellan radiator-in temperaturen och frånluftstemperaturen så krävs det att radiator-in temperaturen varierar så att lämpliga mätdata erhålles. En sådan lämplig signal är PRBS. Den antar bara två värden. I det aktuella fallet så valdes temperaturnivåerna  $40^{\circ}\text{C}$  och  $60^{\circ}\text{C}$ , vilket var ett medelvärde av den vid tillfället utgående radiator-temperaturen. Grundperioden  $T$  sattes till en timme och ordningstalet  $n$  sattes till 4. Grundperioden  $T$  anger den kortaste tid som signalsekvensen ligger på samma värde och  $nT$  anger den längsta. Hela signalens periodtid är  $(2^n - 1)T$ .

För att få radiator-in temperaturen att följa den valda sekvensen så måste denna temperatur regleras med radiatorventilen. Någon programstyrning av ventilläget var ej möjlig att genomföra. En ändring av ventilläget ger en viss momentan temperaturändring, men efter det att radiatorvattnet cirkulerat ett varv så ändras temperaturen ytterligare något, eftersom radiator-ut temperaturen har ändrats. Temperaturreglering av radiatorvattnet sker genom att värma det cirkulerande radiatorvattnet i en värmeväxlare. Cirkulationstiden är omkring 15 minuter.

En I-regulator valdes för att reglera radiator-in temperaturen. Plattvärmväxlaren är en snabb process med en dynamik i tidsområdet några till ett tiotal sekunder och med ett samplingsintervall på 60 s, så kommer processdynamiken att försummas och därför kan en I-regulator användas. Processförstärkningen bestämdes till  $0.1^{\circ}\text{C/s}$ . Den totala gångtiden var 300 s, vilket ger en total förstärkning på  $30^{\circ}\text{C}$ . Radiatorvattnet kan alltså värmas upp omkring  $30^{\circ}\text{C}$ .

Regulatorförstärkningen dimensionerades så att reglerfelet skulle halveras vid varje samplingsintervall. Regulatorparametern blev  $-5 \text{ s}^{\circ}\text{C}$ . I FIG.4.1 återges börvärdet och ärvärdet för radiator-in temperaturen. Att uppgångarna är snabbare än nergångarna beror på att kylning kan endast

ske genom att låta radiatorvattnet cirkulera runt.

Temperaturgivaren för utetemperaturen var placerad i en friskluftsventil där vi trodde att uteluften alltid strömmade in. Det visade sig dock att det under första delen av experimentet blåste så kraftigt, och från en sådan riktning, att luften gick ömsom utifrån och in och ömsom inifrån och ut genom ventilen, så de värden vi mätte blev ibland någonting mellan ytter- och innertemperaturen. För att komma ifrån detta vid identifieringen av modellen, så fick dessa felaktiga värden tas bort och ersättas av uppskattade värden, där uppskattningen grundades på de förmodade riktiga värdena.

Under andra delen av experimentet så regnade det tidvis och troligtvis har regndroppar träffat frånluftstemperaturgivarna. Vilket innebar att utsignalen från den träffade givaren snabbt sjönk och sedan något långsammare återvände till sitt rätta värde. Temperaturen hos regnvattnet var ju samma som utetemperaturen, dvs mycket lägre än innertemperaturen, och dessutom så har vattnet vid avdunstningen en lägre temperatur. För att detta inte heller skulle påverka identifieringen av modellen, fick också dessa felaktiga värden tas bort och ersättas med de uppskattade riktiga värdena.

Av FIG.4.2 framgår det att en temperaturändring på  $20^{\circ}\text{C}$  under en timme i radiatortemperatur påverkar frånluftstemperaturen med omkring en grad. Detta innebär att det är möjligt att påverka frånluftstemperaturen med radiator-in temperaturen.

Att frånluftstemperaturen från de fyra olika trapphusen är i stort sett lika framgår av FIG.4.3.

Dessutom så framgår det att frånluftstemperaturen är något ojämnare under dagen än under natten, vilket är naturligt, då olika värmetillskott tillförs byggnaden under dagen och då varierande vädring också sker.

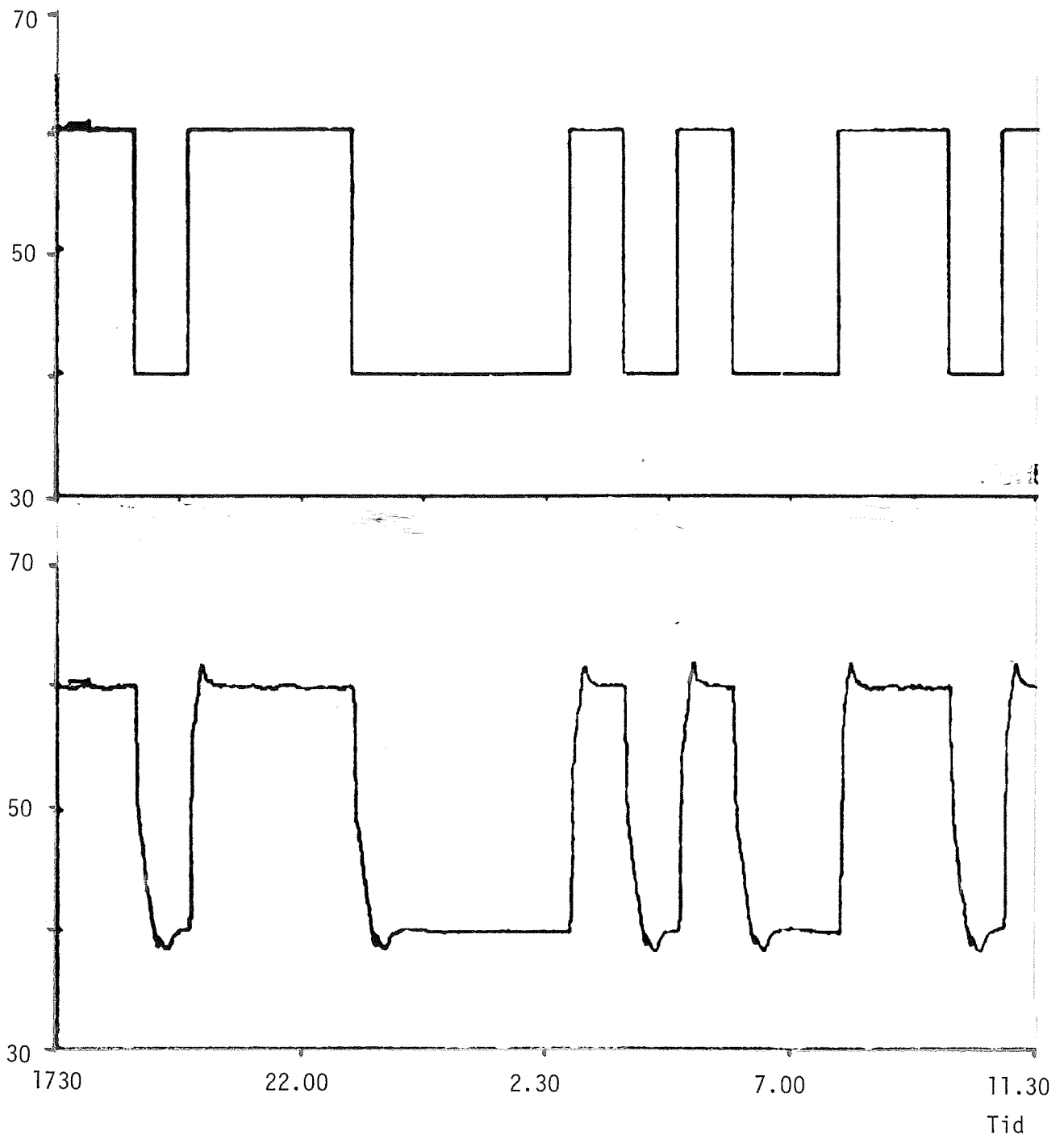


FIG.4.1 Identifieringsexperiment utfört 1977-03-05.

Övre kurva: Börvärde för radiatorillopp

Undre kurva: Radiatorillopp

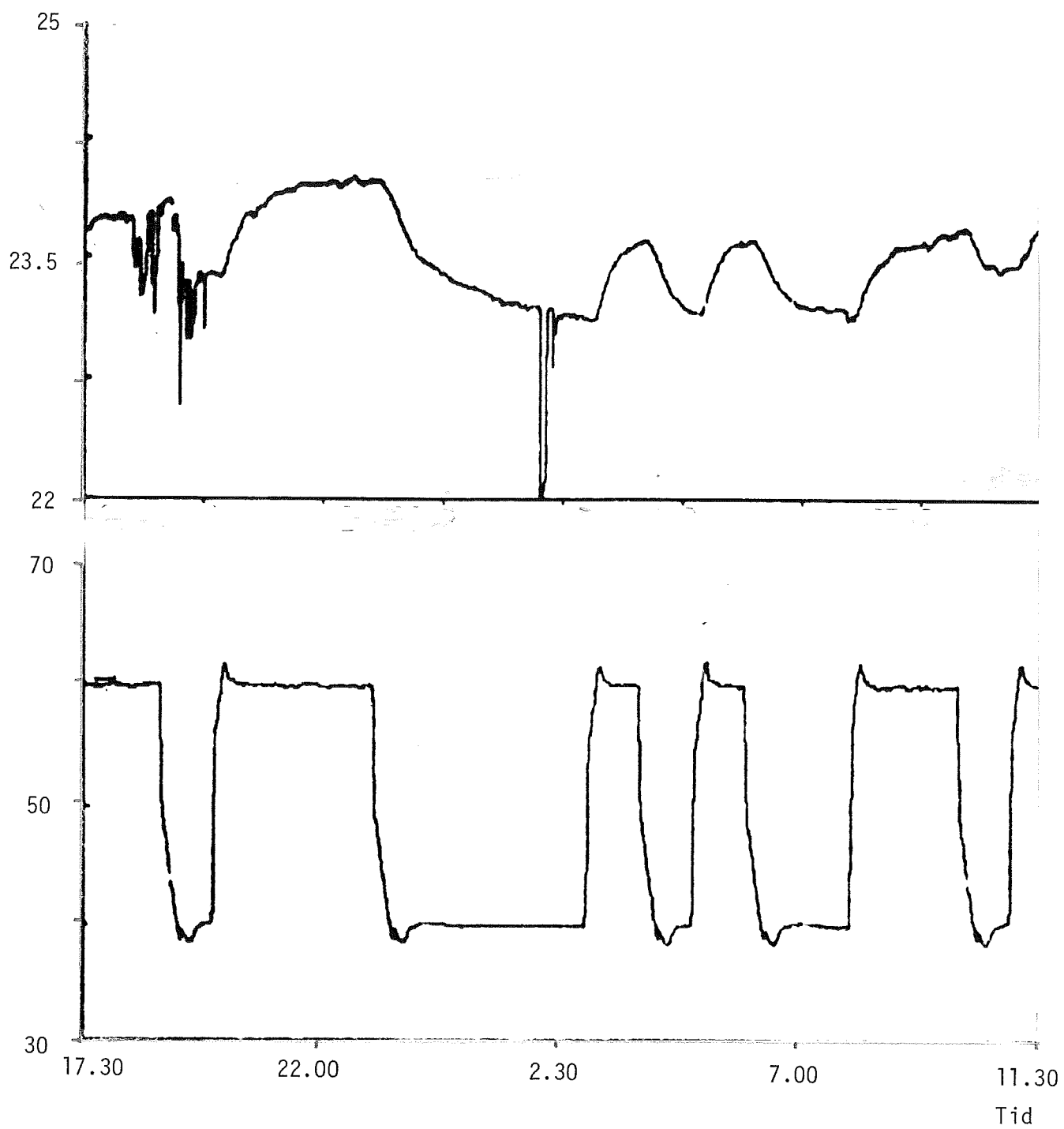


FIG.4.2 Identifieringsexperiment utfört 1977-03-05.  
Övre kurva: Frånluftstemperatur i trapphus 2  
Undre kurva: Radiatorillopp

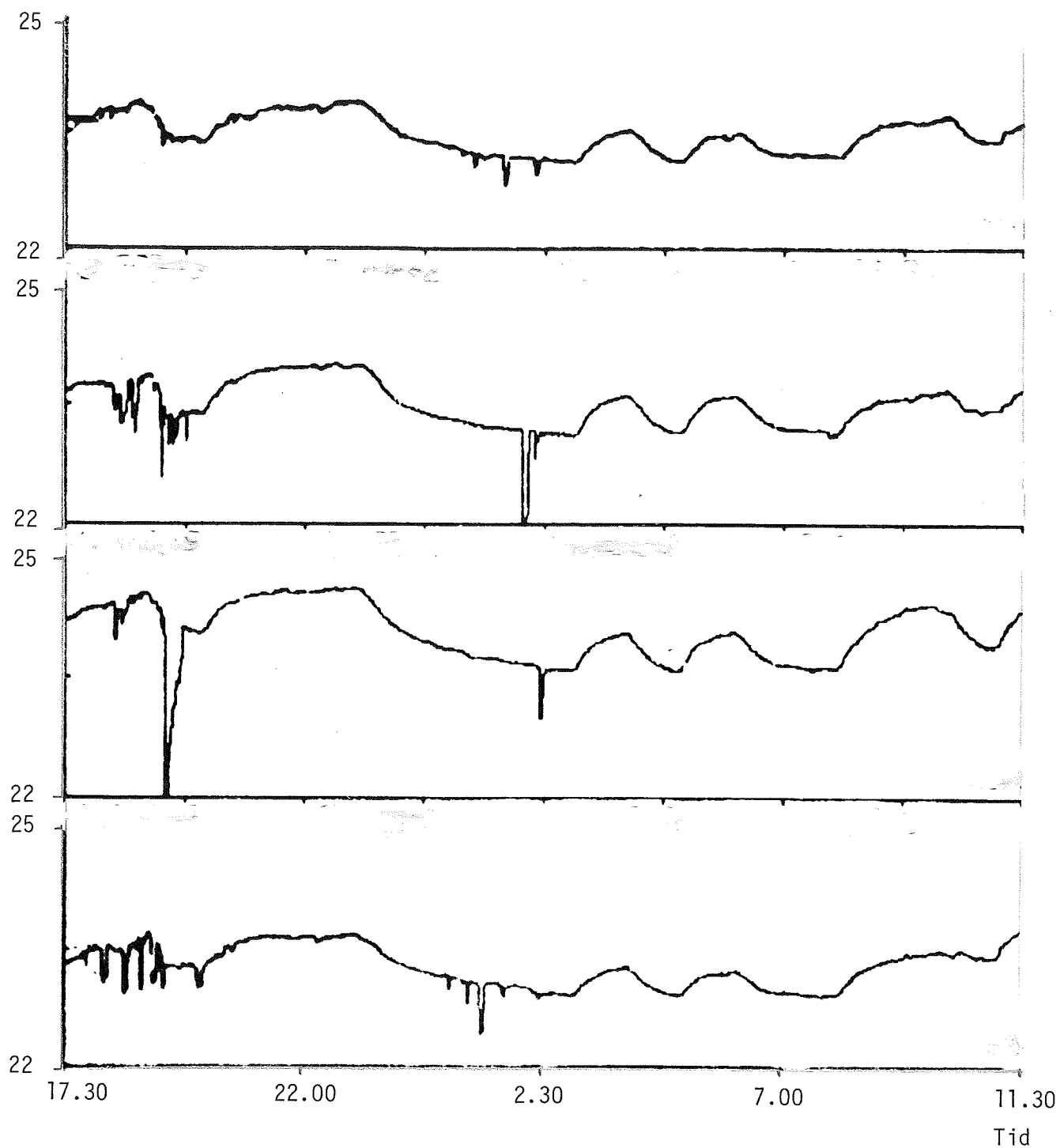


FIG.4.3 Identifieringsexperiment utfört 1977-03-05.

Frånluftstemperatur. Kurvorna uppifrån:

Trapphus 1, gavel söder

Trapphus 2

Trapphus 3

Trapphus 4, gavel norr

## 5 MODELLBYGGE

Modell och identifieringsmetod

Syftet med att ta fram en modell för huset är att den skall kunna användas för att simulera olika typer av digital reglering. En lämplig modell är en samplad modell av typen

$$\begin{aligned}
 y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_n y(t-n) = \\
 b_{11} u_1(t-1) + b_{12} u_1(t-2) + \dots + b_{1n} u_1(t-n) + \\
 b_{21} u_2(t-1) + b_{22} u_2(t-2) + \dots + b_{2n} u_2(t-n) + \\
 b_{m1} u_m(t-1) + b_{m2} u_m(t-2) + \dots + b_{mn} u_m(t-n)
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

I modellen ovan är  $y(t)$  utsignalen,  $u_1(t)$  till  $u_m(t)$   $m$  insignaler och dess ordningstal är  $n$ .

Modellparametrarna bestäms med minsta kvadratmetoden som minimerar det kvadratiska felet mellan mätdata och modellen. Kravet för att parameterbestämningen skall lyckas så krävs det att de använda insignalsekvenserna är linjärt oberoende.

All bearbetning av mätdata och modellenpassning utfördes med det interaktiva programpaketet IDPAC (Wieslander (1976)).

Ett utmärkande drag för programpaketet är bruket av kommandosträngar. Genom att ange ett kommando och tillhörande argument, definierade i programpaketet, kan mycket komplicerade operationer utföras. Inmatningen av kommandon och den därpå följande avkodningen sköts av ett antal subrutiner med det kollektiva namnet INTRAC.

Ett annat karakteristiskt drag hos programpaketet är bruket av macros. Det ger användaren en möjlighet att lagra en viss följd av instruktioner för senare och återkommande användning.

Vi fick ganska allvarliga störningar på våra mätdata, se avsnitt 4. För att trots detta få en god identifiering av processparametrarna, var vi

tvungna att rätta dessa felaktiga mätvärden.

Vid identifieringen skrevs en macro med uppgift att skala och att bilda medelvärdet av de fyra frånluftstemperaturerna vid varje mättillfälle. Dessutom subtraherar den det totala medelvärdet från varje enskilt medelvärde. Det senare fordras för en korrekt identifiering av småsignalsförstärkningen.

### Modell radiator-in temperatur och utetemperatur-frånluftstemperatur

Den bästa minsta kvadratmodellen av systemet frånluftstemperatur-radiatortilloppstemperatur visade sig vara en modell av första ordningen som även tar hänsyn till utetemperaturen.

$$y(t) - 0.977 y(t-1) = 0.000782 u_1(t-1) + 0.00336 u_2(t-1) \quad (5.2)$$

Förlustfunktionen blev  $V(0) = 10.424$  och

$y(t)$  = frånluftstemperaturen

$u_1(t)$  = radiatortilloppstemperaturen

$u_2(t)$  = utetemperaturen

Det visade sig vid identifieringen att den funna tidsfördröjningen på 10 min mellan frånluftstemperaturen och radiatortilloppstemperaturen inte hade någon betydelse. Detta beror på att ett hus är ett mycket trögt system. FIG.5.1 visar en simulering av det ovan givna systemet. I figuren är också upptagna mätdata uppritade. Som synes är överensstämmelsen mellan modell och verklighet god.

Förstärkningen mellan radiatortemperaturen och frånluftstemperaturen fås som

$$g_1 = \frac{b_1}{(1+a)} = 0.034 \quad (5.3)$$

och för utetemperaturen så fås

$$g_2 = \frac{b_2}{(1+a)} = 0.15 \quad (5.4)$$



Parametern  $g_1$  kan tolkas så att om radiatortemperaturen ändras en grad så ändras frånluftstemperaturen 0.034 grader. Motsvarande värde för en ändring av utelufttemperaturen är 0.15 grader. Observera att dessa värden avser småsignalförstärkningen dvs små ändringar kring en arbetspunkt. Därför behöver de ej stämma överens med de statistiska värdena som avser den globala förstärkningen.

Parametern  $g_1$  beräknad från statistiska data borde vara omkring 0.3. Utan någon uppvärmning så blir frånluftstemperaturen lika med utelufttemperaturen. Parametern  $g_2$  borde därför vara lika med ett.

Modellens tidskonstant har beräknats till  $T=43$  minuter.

Vidare gäller modellen endast för ett begränsat tidsområde från några minuter upp till några timmar beroende på den valda insignalsekvensen PRBS. Modellen omfattar alltså den snabbare dynamiken och inte den långsammare. Endast den snabbare är av reglertekniskt intresse.

### Teoretisk modell

En enkel modell för frånluftstemperatur kan tas fram med utgångspunkt från några dimensionerande data

frånluftstemperatur	20 °C
radiatormedeltemperatur	70 °C
utetemperatur	15 °C
luftväxlingar	0.75 h <sup>-1</sup>

Vidare så antas att transmissionen och ventilationsförlusterna är lika stora. Värmeutbytet mellan rumsluft och väggar, golv och tak antas vara 1 W/m<sup>2</sup>°C och m<sup>3</sup> luftvolym.

En enkel värmebalansekvation för en m<sup>3</sup> rumsluft (=frånluften) är

$$Cx(t) = Ah_1(u_1(t) - x(t)) + Ah_2(u_2(t) - x(t)) + Ah_3(u_3(t) - x(t)) \quad (5.5)$$

Här är

$x(t)$  = rumslufttemperatur

$u_1(t)$  = radiatortemperatur

$u_2(t)$  = utetemperatur

$u_3(t)$  = vägg-golv-tak temperatur

Observera att den andra termen i det högra ledet avser både ventilation och transmission.

Statiska data ger att

$$0 = Ah_1(70-20) + Ah_2(-15-20)$$

$$Ah_1 = 0.7 Ah_2$$

Vidare så gäller att

$$Ah_2 = Ah + Q$$

där

$$Ah = Q$$

och

$$Q = nC$$

dvs

$$Ah_2 = 2nC$$

För en luftvolym  $m^3$  så blir modellparametrarna följande:

$$C = 1 \text{ kJ/}^\circ\text{C}$$

$$n = 0.75 \text{ h}^{-1}$$

$$Ah_1 = 1.4nC = 1.05 \text{ kJ/}^\circ\text{Ch}$$

$$Ah_2 = 2nC = 1.50 \text{ kJ/}^\circ\text{Ch}$$

$$Ah_3 = 1 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C} = 3.6 \text{ kJ/}^\circ\text{Ch}$$

Den statiska förstärkningen mellan radiatortemperatur-rumslufttemperatur och utetemperatur-rumslufttemperatur kan beräknas som

$$g_1 = \frac{Ah_1}{Ah_1 + Ah_2 + Ah_3} \approx 0.17 \quad (5.6)$$

$$g_2 = \frac{Ah_2}{Ah_1 + Ah_2 + Ah_3} = 0.25 \quad (5.7)$$

Tidskonstanten fås som

$$T = C / (Ah_1 + Ah_2 + Ah_3) = 10 \text{ min} \quad (5.8)$$

Överensstämmelsen är i detta fallet dålig mellan de experimentellt bestämda och de teoretiskt beräknade modellparametrarna  $g_1$ ,  $g_2$  och  $T$ . En orsak är att dynamiken är av högre ordning.

#### Modell radiator-in temperatur-radiator-ut temperatur

Vi tog även fram en modell av systemet radiator tillloppstemperatur-radiatorreturtemperatur. En minsta kvadratmodell av första ordningen med en tidsfördröjning på 5 minuter visade sig ge bäst resultat.

$$y(t) - 0.865 y(t-1) = 0.0853 u(t-6) \quad (5.9)$$

Förlustfunktionen erhöll värdet  $V=10.42$  och

$$\begin{aligned} y(t) &= \text{radiatorfrånluftstemperatur} \\ u(t) &= \text{radiator tillloppstemperatur} \end{aligned}$$

FIG.5.2 visar en simulering av det ovan givna systemet samt upptagna mätdata. Även här är överensstämmelsen mellan modell och verklighet mycket god. Modellens förstärkning och tidskonstant har beräknats till 0.63 resp 6.9 min.

#### Teoretisk modell

En enkel modell för radiatorsystemet kan tas fram med följande data om

systemet

cirkulationstid	15 min
radiator-in temperatur	80 °C
radiator-ut temperatur	60 °C

En enkel värmebalansekvation är följande

$$C\dot{x}(t) = Q(u_1(t) - x(t)) + Ah(u_2(t) - (x(t) + u_1(t))/2) \quad (5.10)$$

här är

$$\begin{aligned} x(t) &= \text{radiator-ut-temperatur} \\ u_1(t) &= \text{radiator-in-temperatur} \\ u_2(t) &= \text{rumslufttemperatur} \end{aligned}$$

Första termen i högra ledet anger värmetransporten orsakad av vattenflödet och den andra anger utbytet med rumsluften (konvektion och strålning). Statiska data ger att

$$\begin{aligned} 0 &= Q(80-60) + Ah(20 - (80+60)/2) \\ Ah &= 0.4Q \end{aligned} \quad (5.11)$$

Cirkulationstiden på 15 min medför att

$$\begin{aligned} Q &= nC \\ n &= 1/15 \text{ min}^{-1} \end{aligned} \quad (5.12)$$

Den statiska förstärkningen mellan radiatorn och radiator-uttemperaturen till modellen (5.10) fås som

$$K = \frac{(Q - Ah/2)}{(Q + Ah/2)} = 2/3 \quad (5.13)$$

Modellens tidskonstant fås som

$$T = C/(Q + Ah/2) = 12.5 \text{ min} \quad (5.14)$$

Överensstämmelsen är i detta fallet avsevärt bättre än för den tidigare modellen.

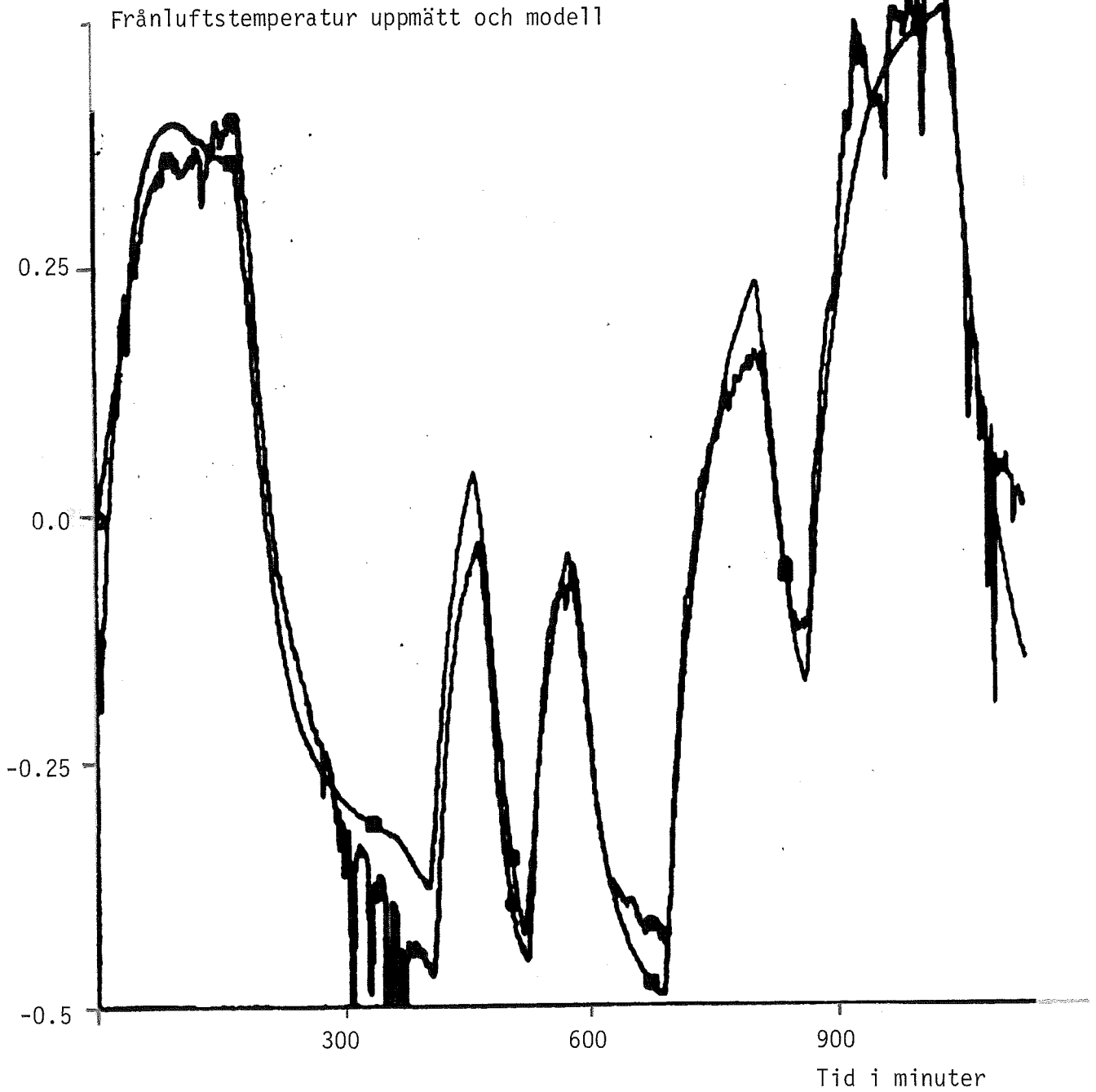


FIG.5.1 Figuren visar en simulering av den framtagna modellen för systemet frånluftstemperatur-radiator tillloppstemperatur samt upptagna mätdata. Medelvärden har dragits ifrån.

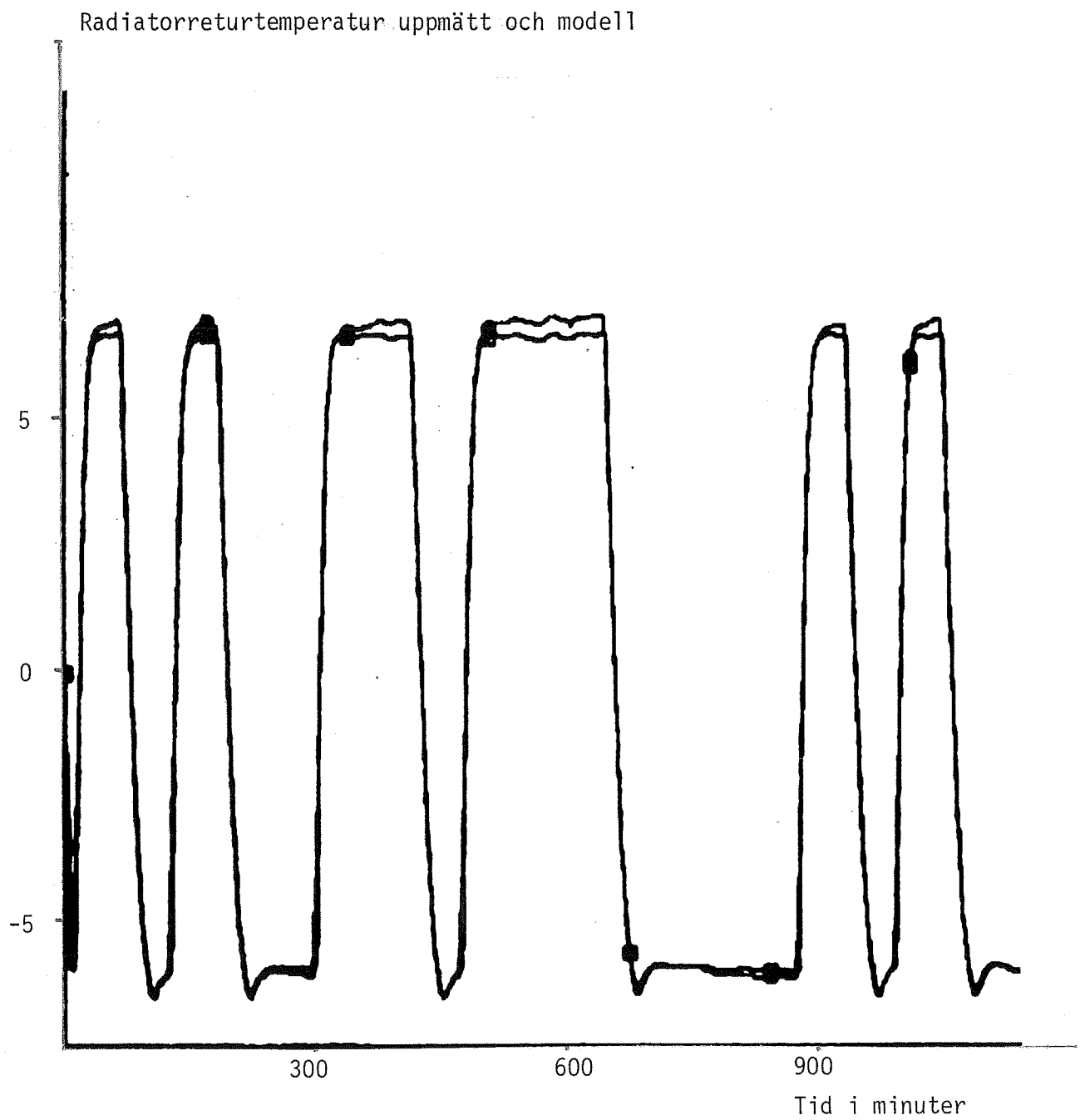


FIG.5.2 Figuren visar en simulering av den framtagna modellen för systemet radiatortilloppstemperatur-radiatorreturtemperatur samt upptagna mätdata. Medlevärdena har dragits ifrån.

## 6 REGULATORBESTÄMNING

För att kunna bestämma en lämplig regulatorstruktur, dvs hur mycket vi skall ändra på radiator-in-temperaturen för att få frånluftstemperaturen lika med ett givet börvärde, så simulerade vi den modell som vi fick av huset med hjälp av IDPAC tillsammans med olika regulatorer för att få fram den bästa.

Denna simulering gjordes med programpaketet SIMNON, Elmqvist (1975), i vilket man skrev upp den modell av huset som vi fick fram, tillsammans med en regulator. Regulatorn var en PI-regulator

$$\Delta u_1(t) = c(y(t)-y(t-1))+d y(t) \quad (6.1)$$

I det högra ledet så motsvarar den första och andra termen P-delen resp I-delen.  $y(t)$  är frånluftstemperatur. Börvärdet antas vara noll. Regulatorns utsignal är  $u_1(t)$  som är den önskade framledningstemperaturen.

Orsaken till att vi skriver regulatorn på  $\Delta u$ -form är för att det dels är enkelt att skriva upp denna i SIMNON, och dels så undviker vi att integralen (summan) blir för stor.

De regulatorer vi skulle titta på var: regulator som vi själva provade fram, dubbelpolsregulator, enkelpolsregulator och dead-beat-regulator. En dubbelpolsregulator är en regulator som gör att huset (modellen) plus regulatorn får formen

$$y(t)(1+rq^{-1})^2 = 0 \quad (6.2)$$

Det slutna systemet uppför sig som om det hade en dubbelpol i  $r$ . En enkelpolsregulator ser analogt ut som

$$y(t)(1+rq^{-1}) = 0 \quad (6.3)$$

Dead-beat-regulatorn är en regulator som slår ner felet i utsignalen (frånluftstemperaturen) till noll, på lika många samplingsintervall, som systemets ordningstal, plus en eventuell tidsfördröjning. Detta medför att styrsignalerna från dead-beat-regulatorn kan bli mycket stora. I



vårt fall skulle, om frånluftstemperaturen låg en grad över referenstemperaturen (börvärdet), dead-beat-regulatorn begära att temperaturen hos vattnet in i radiatorerna sänktes med 1250 °C. Denna regulator är alltså i det här fallet, helt fysikaliskt omöjlig och därför tog vi inte heller med den i simuleringen.

Den modell vi simulerade på var en första ordningens modell med en pol i 0.977. För att kunna snabba upp det slutna systemet något, samt att kunna se vad som händer i närheten av polen 0.977, så lade vi r-värdet (dvs polerna) i området 0.95 till 0.975. För att få en någorlunda realistisk process så begränsades styrsignalen från regulatorn till  $\pm 20$  °C.

För r-värdena 0.950 (0.005) 0.975 så erhålls följande regulatorparamet-

r	c	d
-0.950	-95.2	-3.199
-0.955	-83.01	-2.591
-0.960	-70.76	-2.047
-0.965	-58.45	-1.567
-0.970	-46.07	-1.151
-0.975	-33.33	-0.7996

Modellen för processen var på formen

$$y(t) + a y(t-1) = b_1 u_1(t-1) + b_2 u_2(t-1) \quad (6.4)$$

Genom att sätta  $u_2(t)$  till noll och genom att sätta in ekv.(6.1) i ekv. (6.4) så att styrsignalen  $u_2(t)$  elimineras så fås följande ekvation:

$$y(t+1) + (a - bc - bd - 1) y(t) + (bc - a) y(t-1) = 0 \quad (6.5)$$

Genom att identifiera parametrarna i ekvation (6.2) och (6.5) så kan regulatorparametrarna c och d beräknas som

$$c = (r^2 + a) / b \quad (6.6)$$

$$d = \frac{(r+1)^2}{b} - c \quad (6.7)$$

I första körningen simulerade vi följande tre händelser:

- Höjning av referens-(önskade)-värdet på frånluftstemperaturen med  $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$
- En ramphöjd av utetemperaturen, med  $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$  i minuten, i 200 min.
- En steghöjning av utetemperaturen med  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$

Då vi beräknade c och d-värdena för enkelpolsregulatorn, så visade det sig att c-värdet blev samma för dead-beat-regulatorn, -1250, och d-värdet blev också stort, dvs även denna regulator är fysikaliskt omöjlig. Vi simulerade alltså både enkelpols- och dubbelpolsregulatorerna. Plotterna från de senare simuleringarna finns i FIG.6.1 - 6.3.

Till dubbelpolsregulatorn fick vi rimliga c- och d-värden, vilket gav rimliga styrsignaler. Med hänsyn till att vi ville ha en snabb regulator, men samtidigt en där inte styrsignalerna blev för stora eller ändrades hela tiden, så att ställmotorn skulle få gå mycket, och därvid slita ut både sig själv och värmväxlarventilen, så valde vi koefficienterna  $c = -70$  och  $d = -2$ .

Då vi senare körde med denna regulator på huset, så började frånluftstemperaturen självsvänga. Detta visade sig bero på att det fanns en tidsfördröjning på cirka tio minuter, mellan temperaturen i vattnet in i radiatorerna och frånluftstemperaturen. Någon tidsfördröjning kunde inte bestämmas vid identifieringen trots att modeller med olika tidsfördröjning provades.

Vi lade då i programmet HUS in satser så vi kunde få fördröjningar på 0 till 10 minuter. Då vi simulerade med olika fördröjningar, fick vi med tio minuters fördröjning, svängningar av ungefär samma storlek som vid fullskalekörningen på huset. Då simulerade vi systemet med tio minuters fördröjning, och med enbart dubbelpolsregulatorn, denna gång. De händelser vi simulerade var:

- Höjning av referensvärdet på frånluftstemperaturen med  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$
- En ramphöjning av utetemperaturen med  $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$  per minut i 100 minuter

Dessa plotter finns i FIG.6.4 och 6.5.

För att ta reda på när systemet började självsvänga, så simulerade vi en P-regulator enbart (ingen I-del, dvs  $d=0$ ). Vi fann då att självsvängningarna började vid  $c$  ungefär lika med  $-46$ . Genom att sänka  $c$  och sätta tillbaka I-delen i regulatorn ( $d=10$ ), så fann vi vid vidare simulering att  $c=-45$  och  $d=-1.2$  var en regulator som inte fick modellsystemet att självsvänga. Plotterna från simuleringarna med dessa regulatorer finns i FIG.6.6 och 6.7.

För att kunna vara på större avstånd från självsvängningsgränsen, men ändå kunna ha en snabb regulator så valde vi slutligen  $c=-40$  och  $d=-1.2$ . Talen  $-40$  och  $-1.2$  innebär att, om t ex frånluftstemperaturen ligger  $0.1$  grad C för högt, så ska radiator-in-temperaturen ändras med

$$-40 \cdot 0.1 + (-1.2) \cdot (\text{summan av alla frånluftstemperaturfel})$$

dvs om summan är noll så ska radiator-in-temperaturen sänkas med 4 grader C.

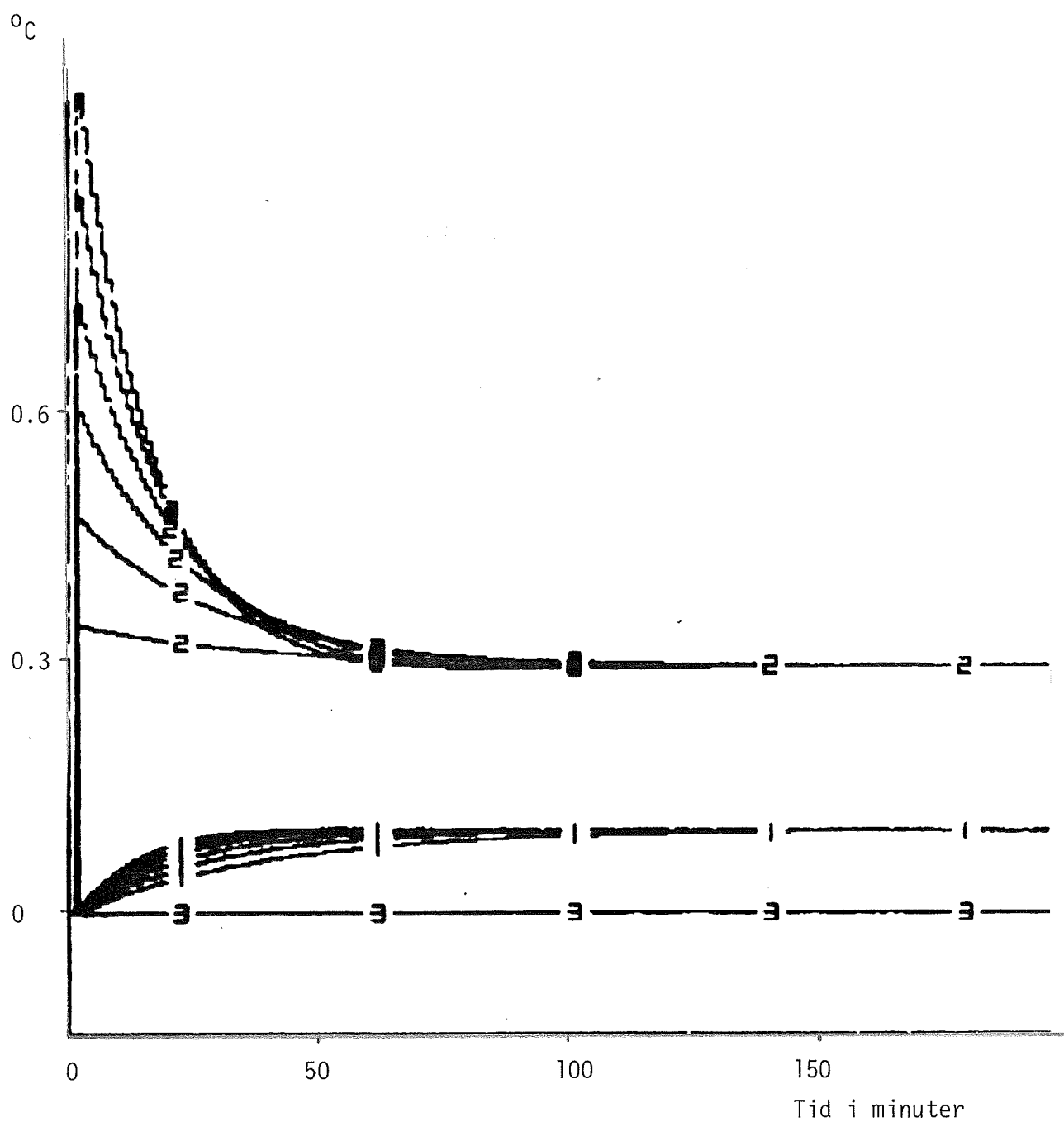


FIG.6.1 Højning av börvärdet för frånluftstemperatur med 0.1 °C.

Dubbelpolsregulator.

1 = frånluftstemperatur

2 = styrsignalen från regulatorn till regulator-in dividerad med 10

3 = utetemperaturen dividerad med 10

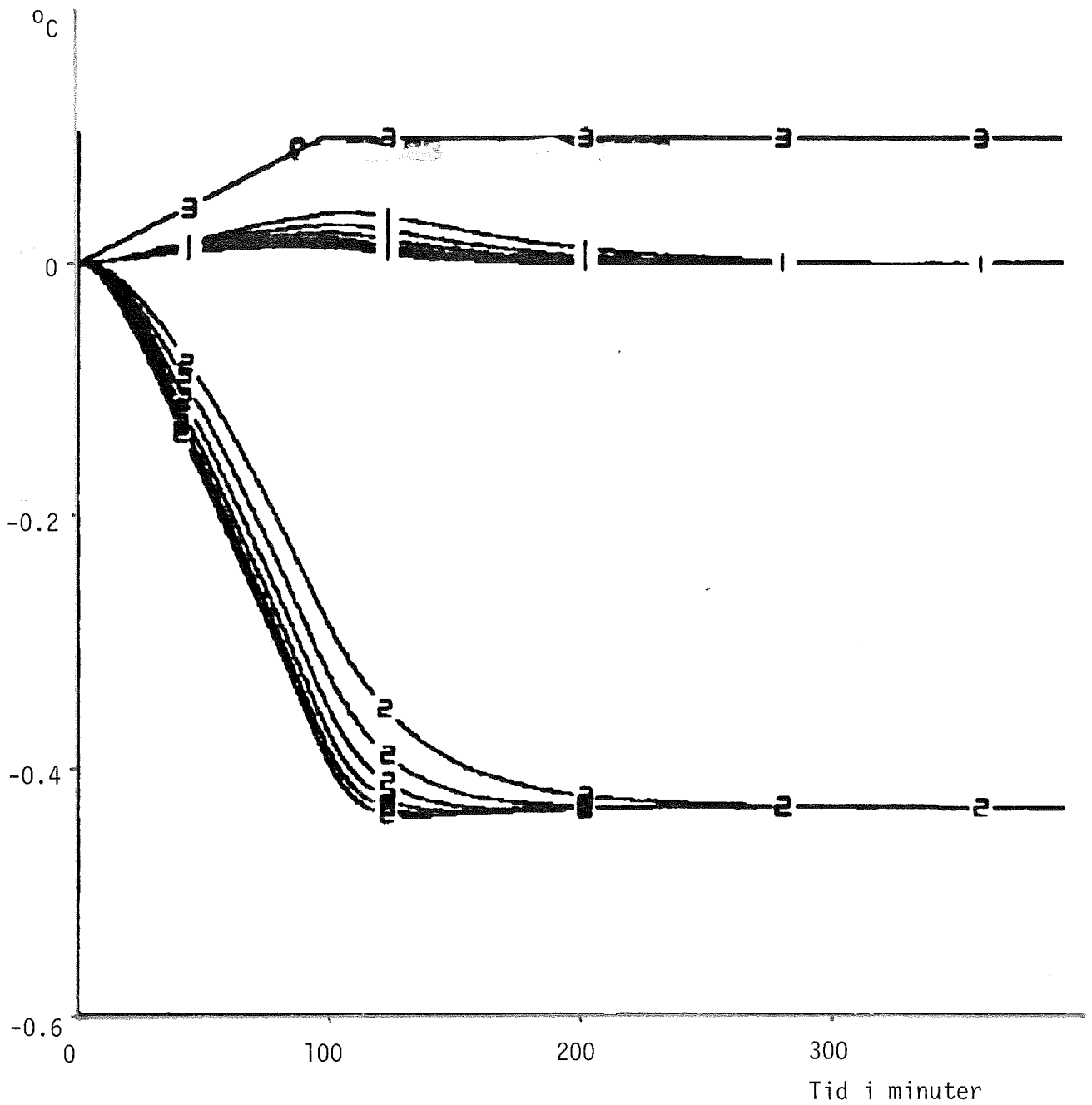


FIG.6.2 Ramphöjning av uttemperaturen med  $0.01^{\circ}\text{C}$  i minuten i 100 min.  
Dubbelpolregulator.

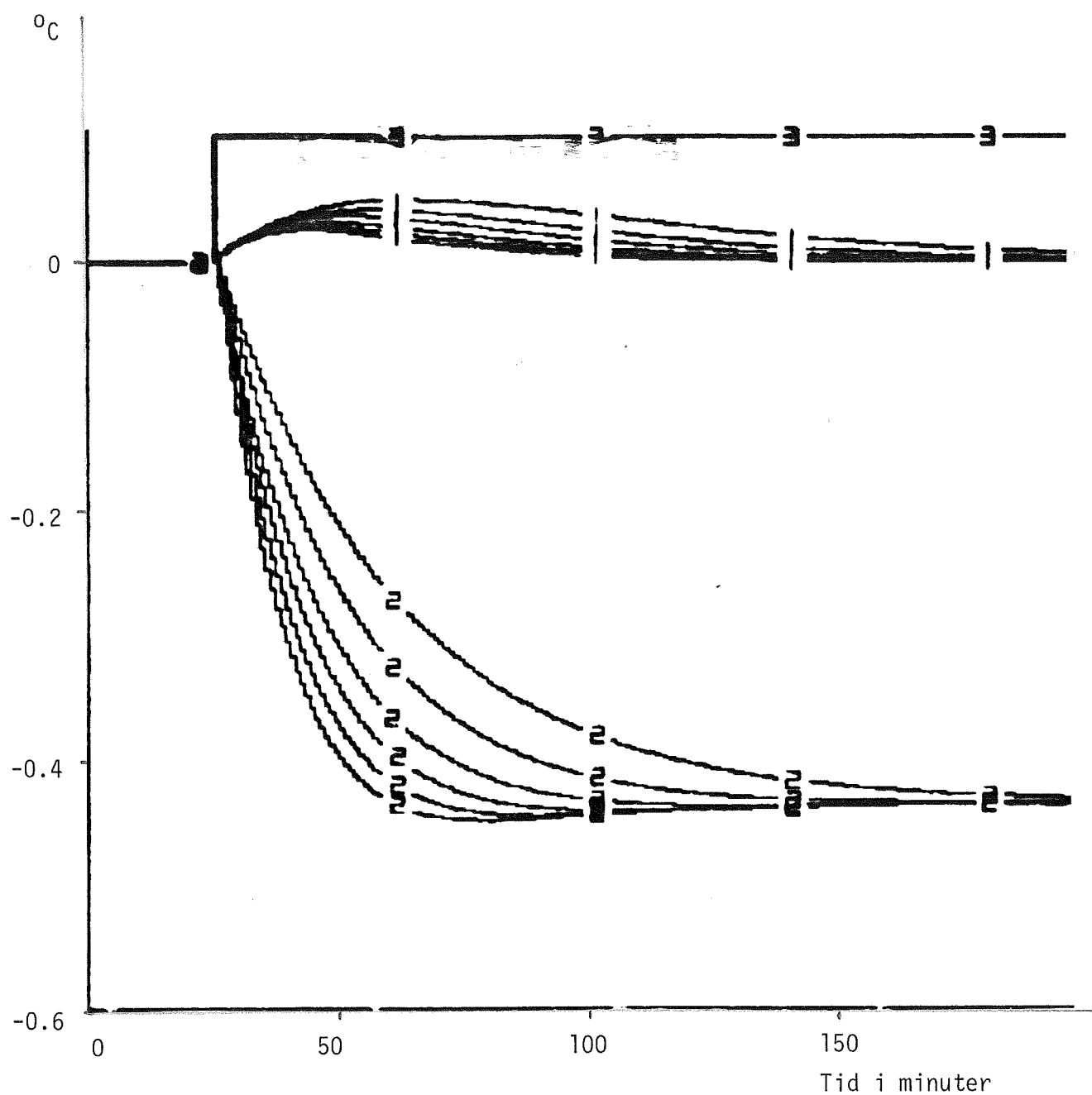


FIG.6.3 Steghöjning av utetemperaturen med 1 °C. Dubbelpolsregulator.

1 = frånluftstemperatur

2 = styrsignalen från regulatorn till regulator-in, dividerad med 10

3 = utetemperaturen dividerad med 10

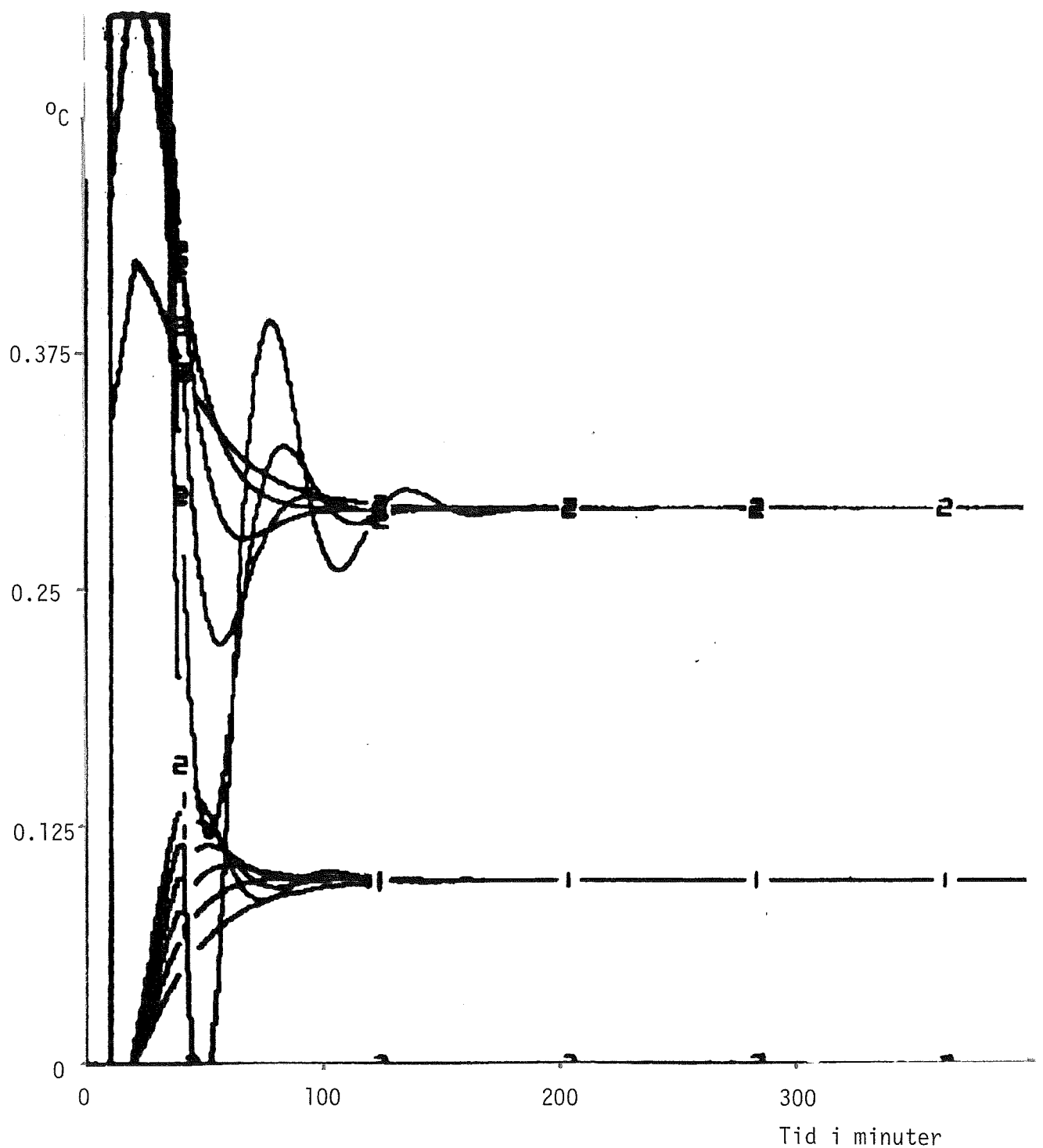


FIG.6.4 Højning av börvärdet för frånluftstemperaturen med  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Dubbelpolsregulator, 10 minuters fördröjning.

1 = frånluftstemperatur

2 = styrsignalen från regulatorn till regulator-in, dividerad med 10

3 = utetemperaturen dividerad med 10

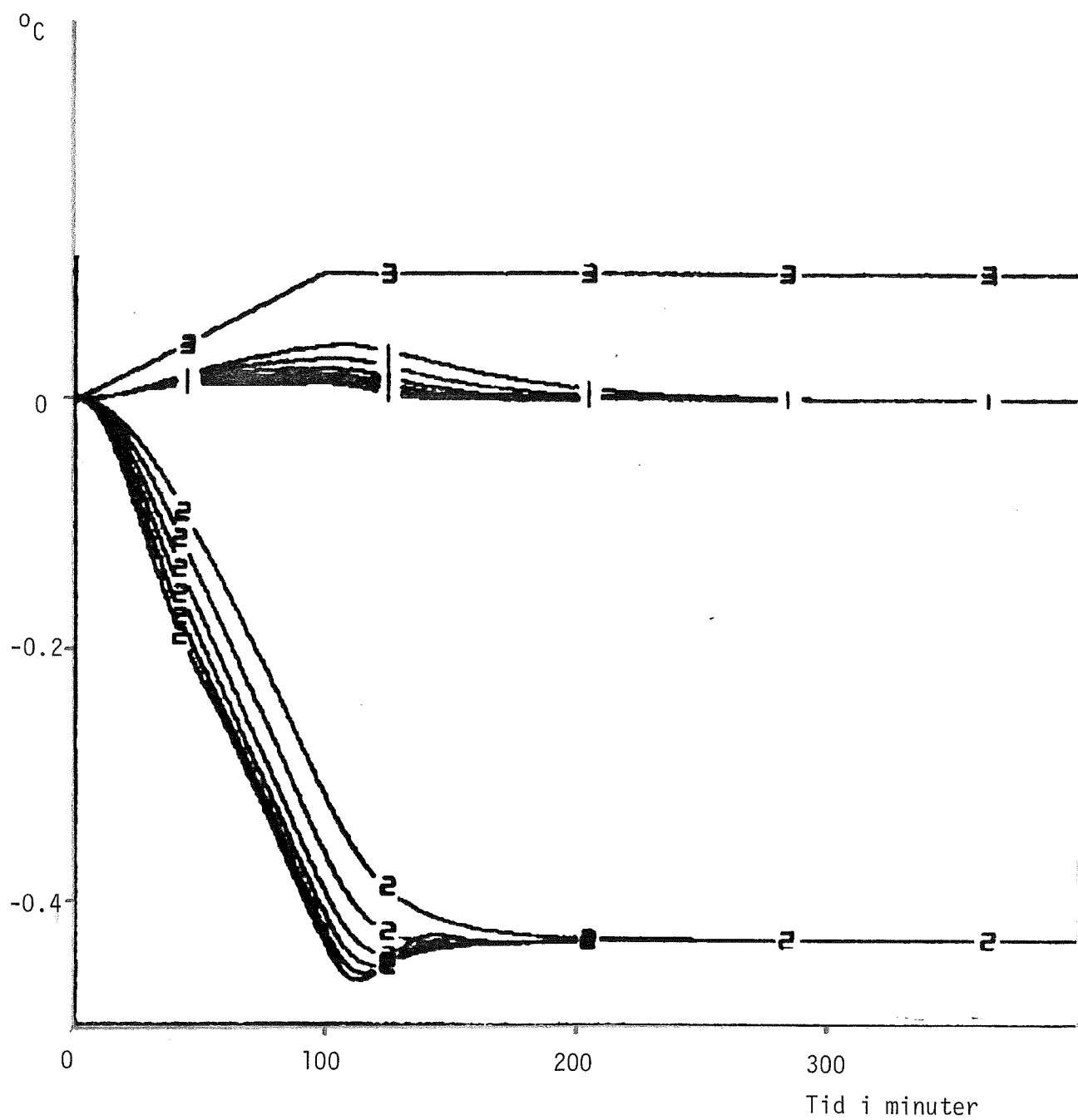


FIG.6.5 Ramphöjning av utetemperaturen med  $0.01^{\circ}\text{C}$  i minuten i 100 min. Dubbelpolsregulator, 10 minuters fördröjning.

1 = frånluftstemperatur

2 = styrsignalen från regulatorn till regulator-in, dividerad med 10

3 = utetemperaturen dividerad med 10



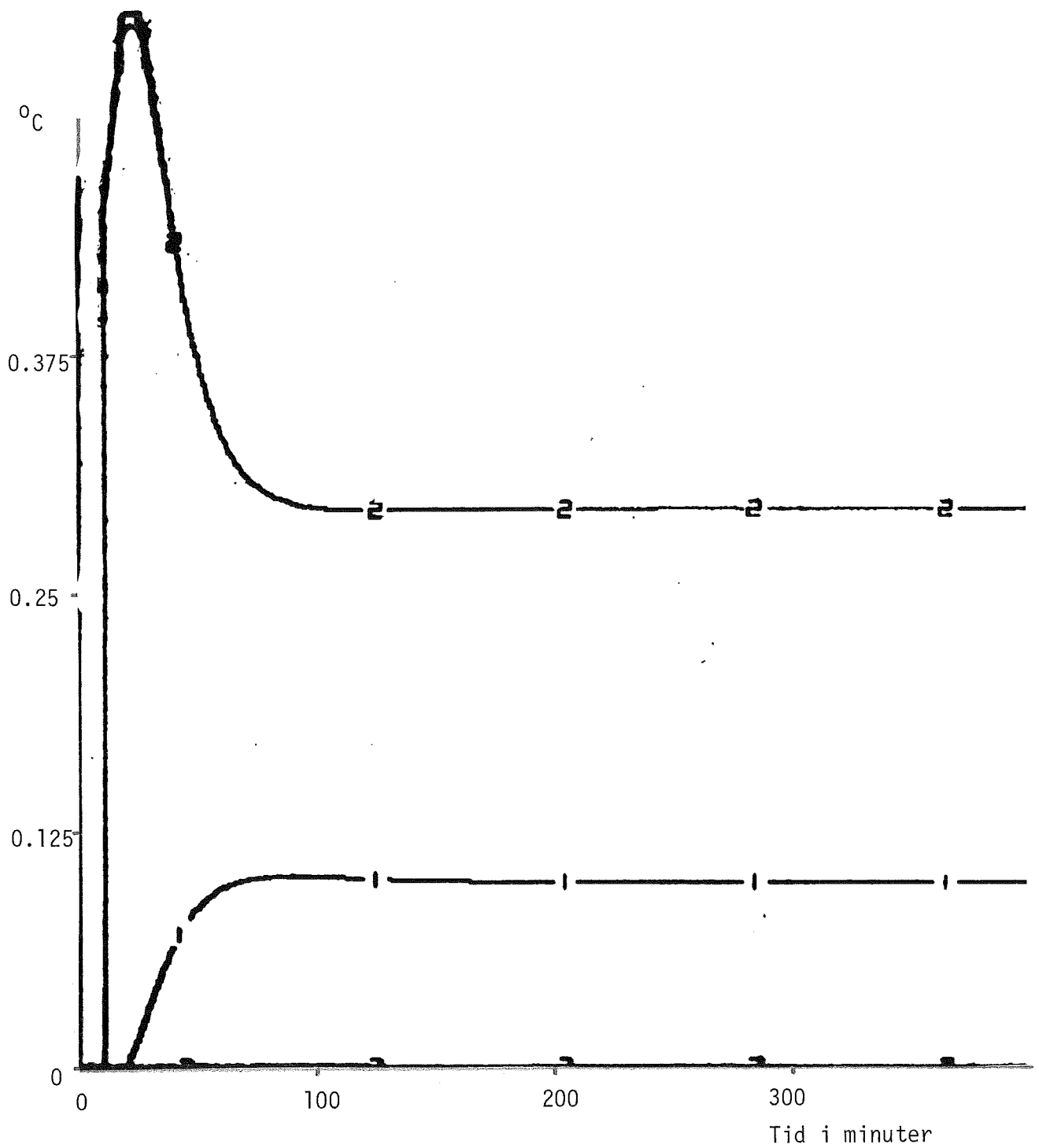


FIG.6.6 Højning av börvärdet för frånluftstemperaturen med  $0.1^{\circ}\text{C}$ .  
 Dubbelpolsregulator, 10 minuters fördröjning.  
 $c = -45$      $d = -1.2$   
 1 = frånluftstemperatur  
 2 = styrsignalen från regulatorn till radiator-in, dividerad  
 med 10  
 3 = utetemperaturen dividerad med 10

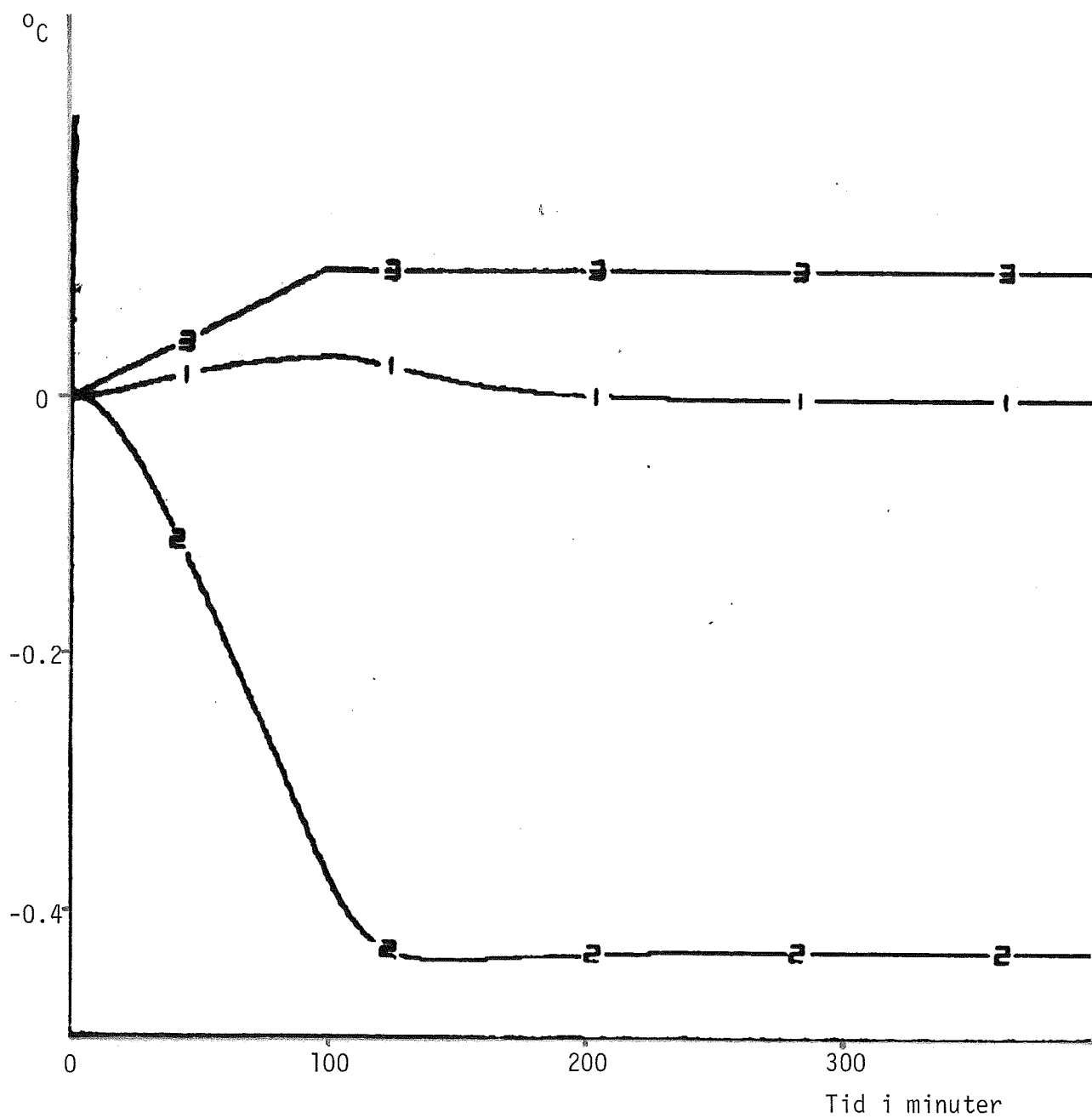


FIG.6.7 Ramphöjning av utetemperaturen med  $0.01^{\circ}\text{C}$  i minuten i 100 min.  
Dubbel-polsregulator, 10 minuters fördröjning.

1 = frånluftstemperatur

2 = styrsignalen från regulatorn till radiator-in, dividerad  
med 10

3 = utetemperaturen dividerad med 10

## 7 DATORREGLERING AV FRÅNLUFTSTEMPERATUREN

I detta avsnitt redovisas tre försök med frånluftsreglering och ett försök med normal reglering.

I det första försöket så användes två regulatorer som var kopplade i kaskad. Frånluftsregulatorns utsignal utgjorde börvärde till framledningstemperaturregulatorn. Den första regulatorn var en PI-regulator och den andra regulatorn en I-regulator på formen

PI-frånluftsregulator

$$u_1(t) = c e_1(t) + d \tilde{e}_1(t) \quad (7.1)$$

$$\tilde{e}_1(t) = \tilde{e}_1(t-1) + e_1(t) \quad (7.2)$$

I-framledningsregulator

$$u_2(t) = -5 e_2(t) \quad (7.3)$$

Regulatorekvationen (7.3) ser ut som en P-regulator, mer än en I-regulator eftersom regulatorns utsignal är ändringar och inte absoluta styr signaler till ställdonet.  $e_1(t)$  och  $e_2(t)$  anger reglerfel i frånluft- och framledningstemperatur.

Vid försöket undersökte vi två olika regulatorer. De första fyra timmarna prövade vi en regulator med  $c=-70$  och  $d=-2$ . Det är samma parametrar som befanns lämpliga vid simuleringen då man försummar tidsfördröjningen i systemet. Den andra regulatorn som prövades hade parametrarna  $c=-46$  och  $d=-1.2$ .

En bild av försöket finns i FIG.7.1. Från denna framgår att vid börvärdesomställningar fås en antydning till självsvängning, som kan slita ut både ställmotorn och reglerventilen. Det framgår också av bilden att regulatorn inte hinner med att kompensera för stigande utetemperatur på morgonen.

Med ledning av resultaten i de inledande försöken utvecklade vi en förbättrad regulator. För att undvika en självsvängning i systemet utför-

des en ny simulering, där hänsyn togs till systemets tidsfördröjning mellan insignal och utsignal. Ur denna simulering framgick det att bästa reglering erhöles med regulatorparametrarna  $c=-40$  och  $d=-1.2$ .

Vid de inledande försöken framgick det också att det erfordras en framkoppling för utetemperatur. Ur tidigare mätdata för huset fann vi att utetemperaturen  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  motsvaras av radiatortilloppstemperaturen  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Med ledning av dessa data och med antagandet att  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ute motsvaras av  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  i radiatorsystemet konstruerades en framkopplingsterm  $f(t)$  från utelufttemperaturen  $u_3(t)$

$$f(t) = k_1 u_3(t) + k_0 \quad (7.4)$$

Med ovanstående uppgifter så kan parametrarna i framkopplingen  $k_1$  och  $k_0$  beräknas till

$$\begin{aligned} k_1 &= -1.75 \\ k_0 &= 55 \end{aligned}$$

Regulatorekvation (7.1) modifieras nu till följande innehållande en framkoppling:

$$u_1(t) = c e_1(t) + d \tilde{e}_1(t) + k_1 u_3(t) + k_0 \quad (7.5)$$

Vid den slutgiltiga datorregleringen utfördes vissa förbättringar av mätapparaturen. Vi tillverkade plåtskydd för frånlufttemperaturgivarna. Dessa skulle skydda givarna mot regn. Temperaturgivaren för utetemperaturen flyttades från friskluftskanalen till ett buskage, beläget vid huset, där den gömdes väl.

Resultatet av regleringen framgår av FIG.7.2 och 7.3. Under likartade temperaturförhållanden tog vi också upp mätdata vid husets normala reglering, se FIG.7.4. Det senare för att jämföra de olika sätten att temperaturreglera.

FIG.7.2 visar resultatet vid datorreglering med en börvärdessänkning av frånluftstemperaturen från  $23.9\text{ }^{\circ}\text{C}$  till  $23.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  under 3 timmar. Denna

sänkning skulle motsvara den vid konventionell reglering vanligt förekommande nattsänkningen. Ett intressant faktum är att trots de regler-tekniskt svåra förhållandena under experimentets senare del så är reglerfelet endast  $0.075^{\circ}\text{C}$ . Först sker en börvärdesändring och därefter en kraftig solinstrålning. Den senare störningen framgår inte av kurvan för utetemperaturen, då givaren för denna är placerad vid norrsidan av huset.

Ett annat regleringsförsök visas i FIG.7.3. Vid regleringens start var frånluftstemperaturen  $24.5^{\circ}\text{C}$ , ett alldeles för högt värde. Vi valde därför börvärdet för frånluftstemperaturen till  $23.9^{\circ}\text{C}$ . Vid tidigare regleringar hade vi valt börvärdet approximativt lika med ärvärdet för att få en mjuk övergång mellan normal reglering och datorreglering. På grund av vårt stora begynnelsefel har integraldelen av regulatorn blivit mycket stor. Detta har i sin tur givit upphov till en inte önskvärd undersväng. Botemedlet är villkorlig integration, vilket lätt kan förverkligas i en dator. Detta kunde tyvärr inte genomföras med det programpaket som vi hade till vårt förfogande. Ett sätt att lösa detta på är att begränsa integralen av reglerfelet  $e_1(t)$  så att framledningsbörvärdet  $u_1(t)$  blir begränsat till ett rimligt intervall. Radiatorbörvärdet  $u_1(t)$  skall ej överskrida  $80^{\circ}\text{C}$ , som är dimensionerande data, och neråt är  $20^{\circ}\text{C}$  eller frånluftstemperaturen en lämplig gräns.

På morgonen utsattes huset för en kraftig solinstrålning, samtidigt som utetemperaturen ökade med  $5^{\circ}\text{C}$  på 8 timmar. Trots dessa svåra förhållanden så lyckades regulatorn hålla frånluftstemperaturen rätt på  $0.07^{\circ}\text{C}$  när.

Mot slutet av experimentet var solinstrålningen så kraftig att regulatorn stängde helt reglerventilen för radiatortillopp. Trots detta steg frånluftstemperaturen. Detta innebär att vi skulle behöva ett kylaggregat för att kunna klara av regleringen. I viss mån har vi faktiskt haft detta, då det i fastighetens källarplan finns två tilluftsaggregat. Dessa aggregat suger in luft till de fyra trapphusen och några källarlokalerna. Luften värms upp i ett värmebatteri anslutet till husets radiatorsystem, som på så sätt kyles ned. Detta är förklaringen till att vi lyckats uppnå en så pass låg temperatur som  $22^{\circ}\text{C}$  på radiatortilloppsvattnet, när frånluftstemperaturen är över  $24^{\circ}\text{C}$ .

En upptagning av mätdata, då husets normala reglering är i funktion, visas i FIG.7.4. En tydlig nattsänkning inträffar mellan klockan 23 och 8. En allvarlig brist vid regleringen märks i slutet av experimentet. Frånluftstemperaturen stiger till över  $24.5^{\circ}\text{C}$  medan regulatorn begär att radiatorilloppstemperaturen skall vara  $40^{\circ}\text{C}$ . Jämför med FIG.7.3 där vår regulator stängde helt reglerventilen.

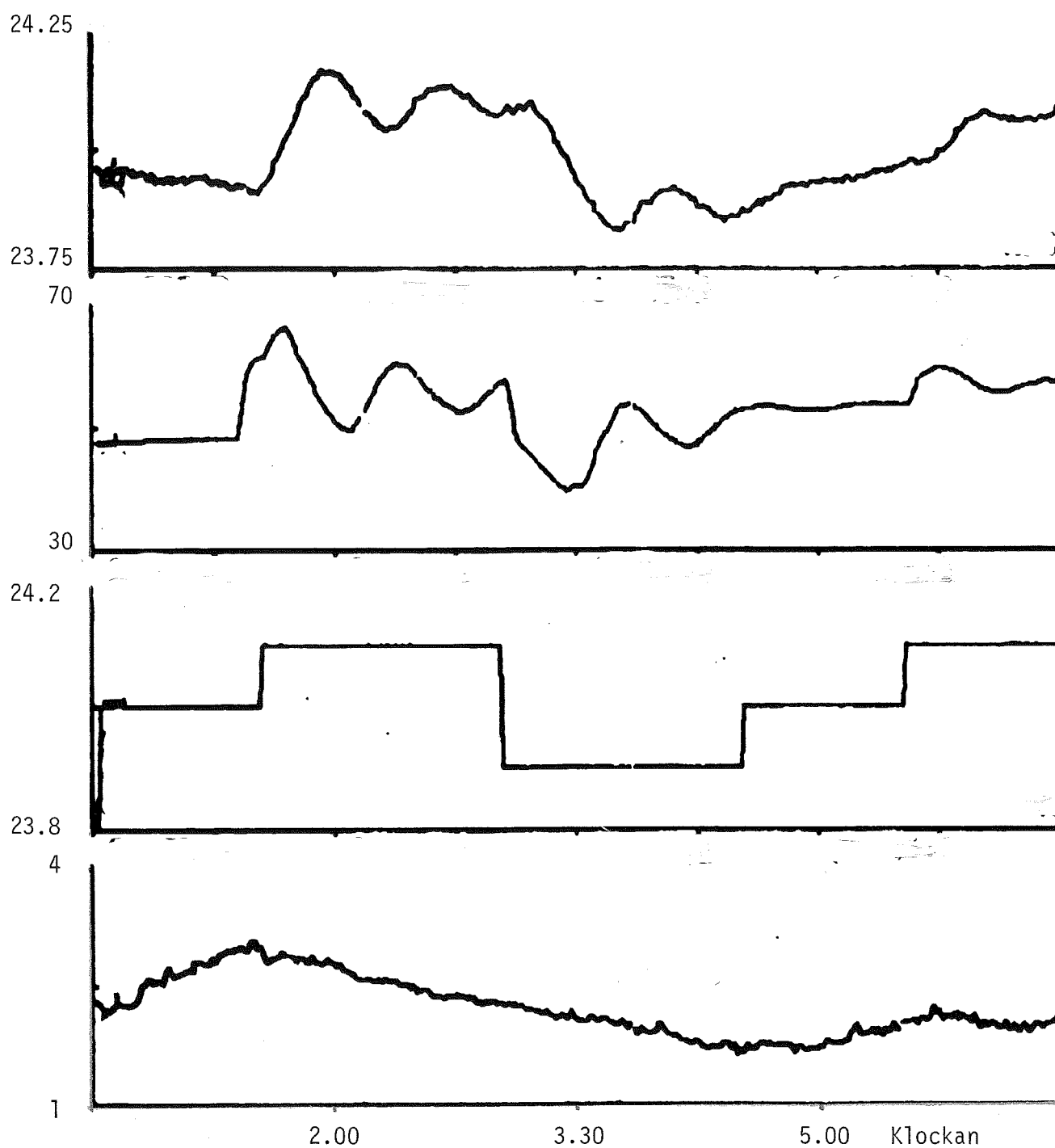


FIG.7.1 Regleringsexperiment utfört 1977-04-20. De 4 första timmarna var regulatorparametern  $c=-70$  och  $d=-2$ , därefter  $c=-46$  och  $d=-1.2$ . Kurvorna uppifrån: frånluftstemperatur, radiatortilloppstemperatur, börvärde frånluftstemperatur och utetemperatur. Ingen framkoppling.

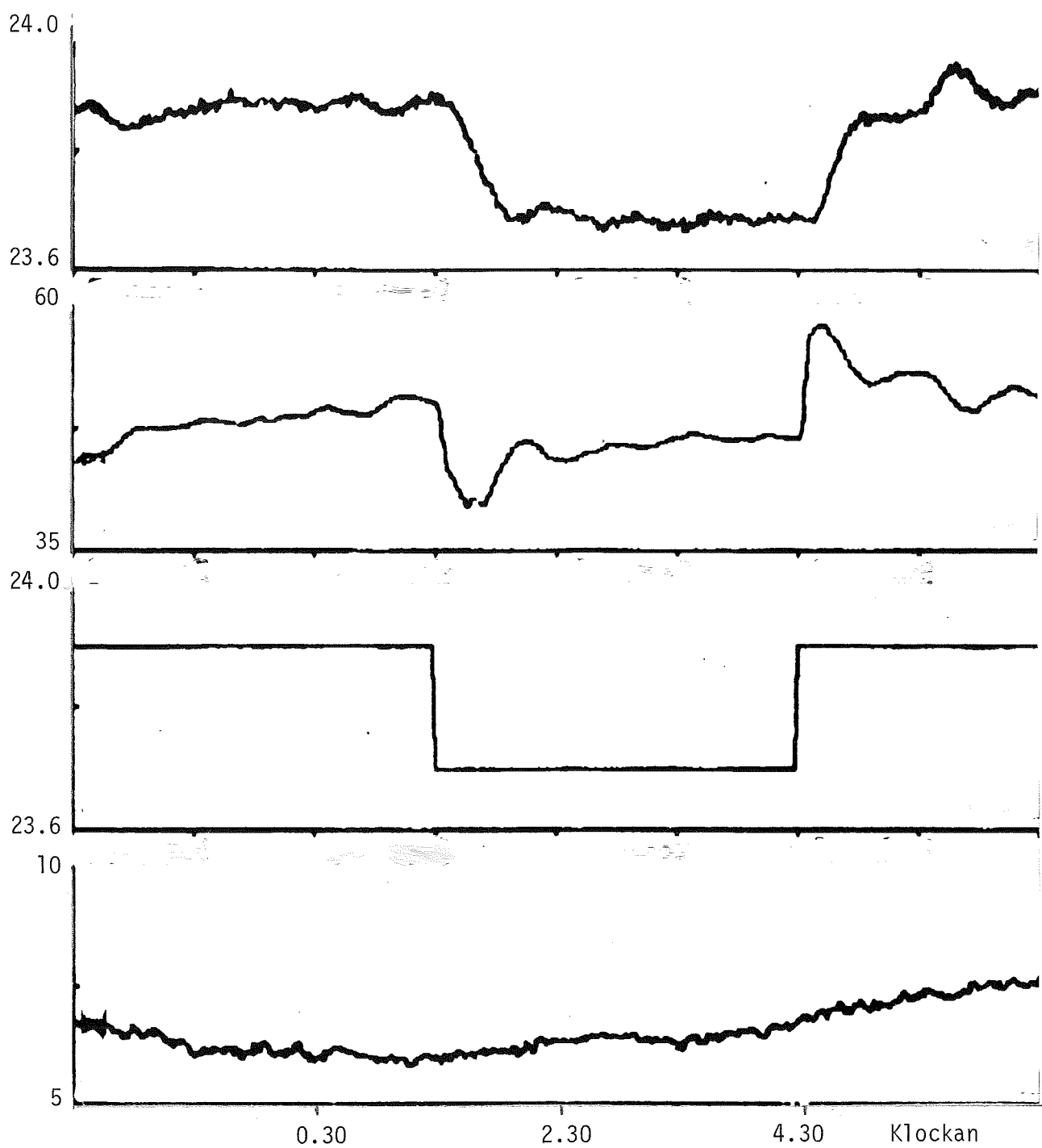


FIG.7.2 Regleringsexperiment utfört 1977-04-28. Regulatorparametern  $c=-40$  och  $d=-1.2$ .  
 Kurvorna uppifrån: frånluftsmiddeltemperatur, radiatortilloppstemperatur, börvärde frånluftstemperatur och utetemperatur.  
 Framkoppling enligt (7.4).



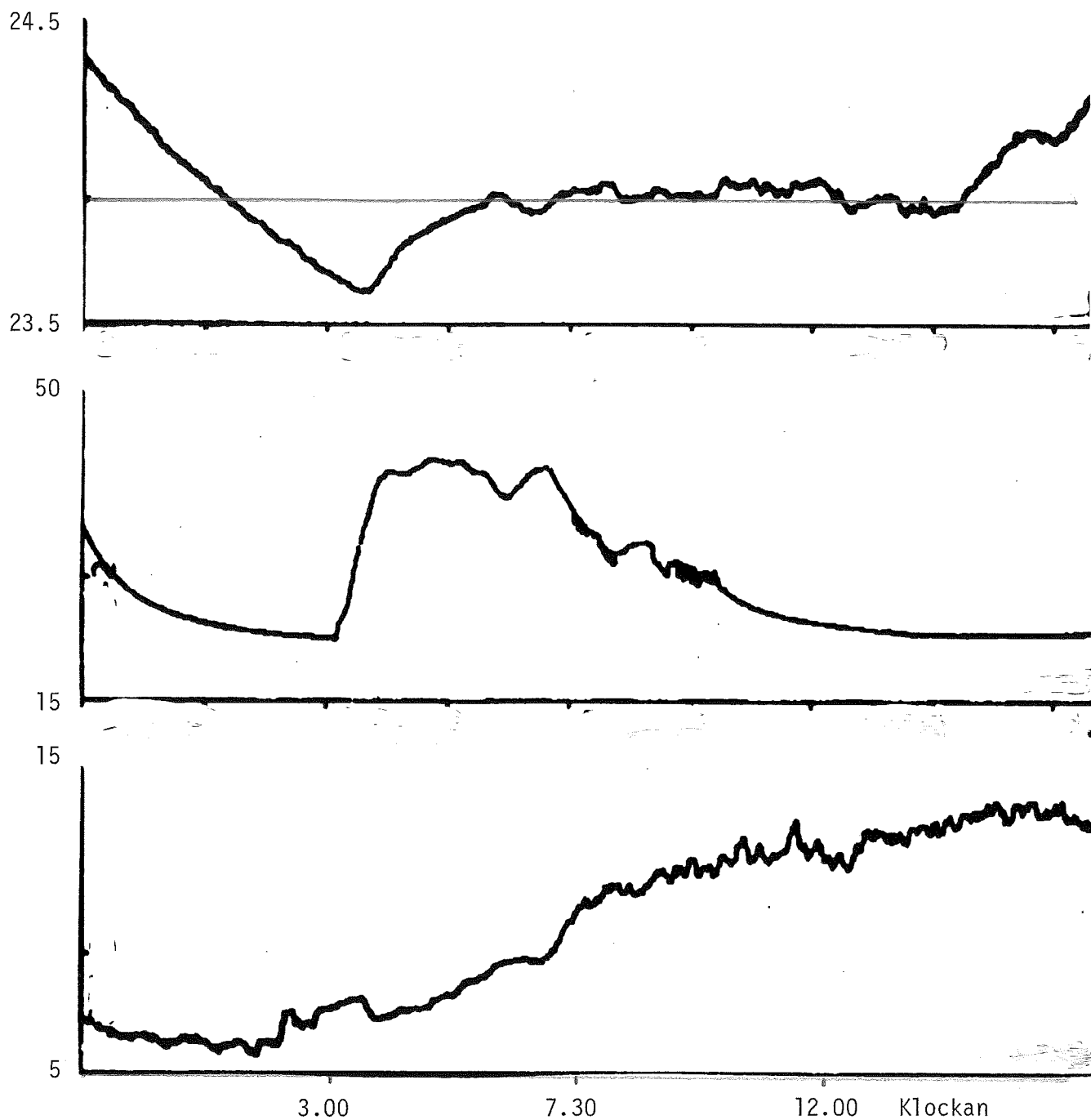


FIG.7.3 Regleringsexperiment utfört med start 1977-05-07. Börvärde frånluftstemperatur =23.9 °C. Regulatorparametern  $c=-40$  och  $d=-1.2$ . Kurvorna uppifrån: frånluftsmiddeltemperatur, radiatortilloppstemperatur och utetemperatur. Framkoppling enligt (7.4).

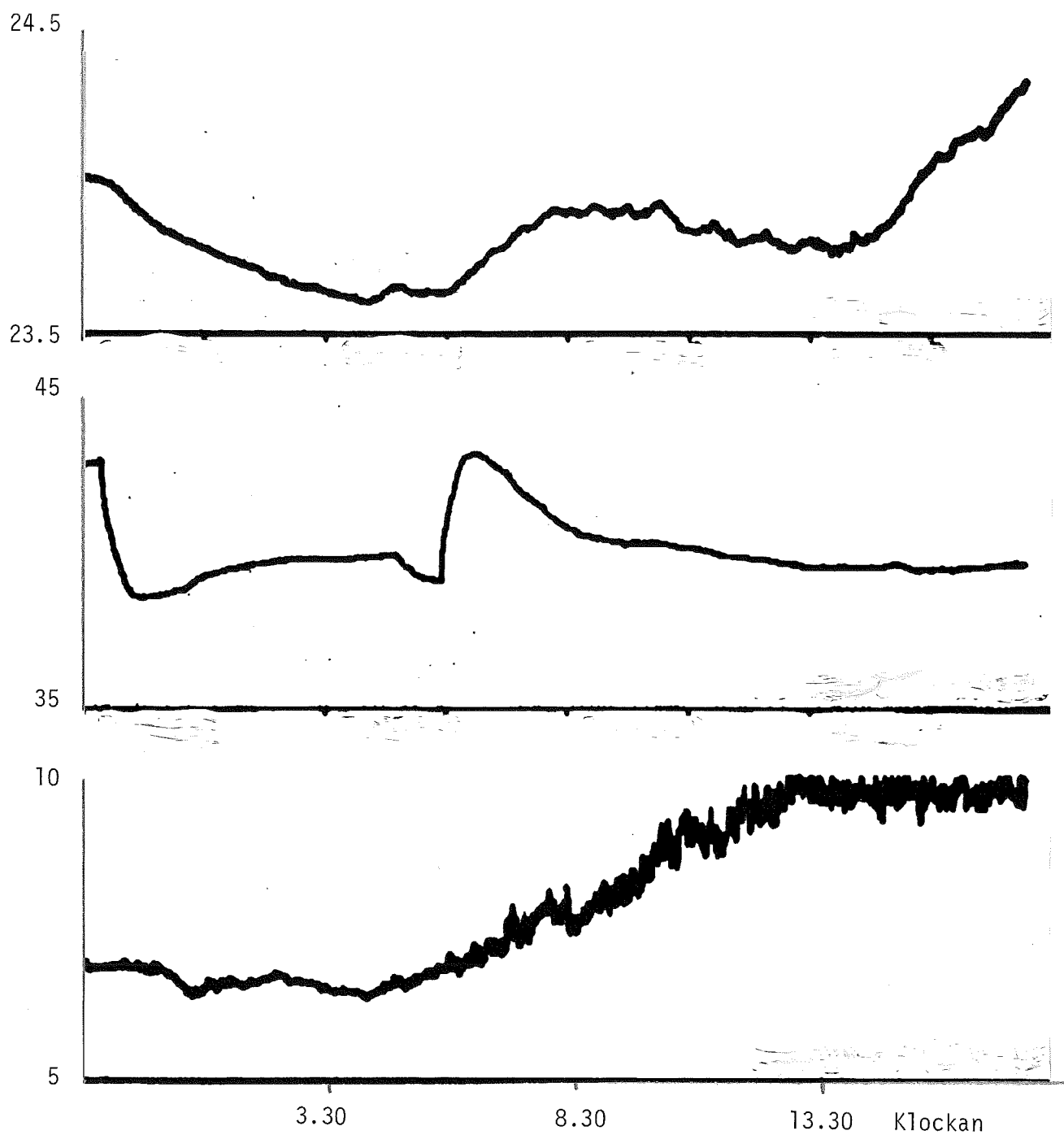


FIG.7.4 Upptagning av mätdata vid normal reglering med start 1977-05-14. Kurvorna uppifrån: frånluftsmiddeltemperatur, radiator tillloppstemperatur och utetemperatur.

## 8 SLUTSATSER

Slutsatserna från arbetet kan sammanfattas med följande punkter

- frånluftstemperaturen kan regleras med god noggrannhet, bättre än  $\pm 0.1$  °C
- framkopplingstermen krävs
- några procents besparing möjlig
- nuvarande nattsänkning ger liten besparing
- merkostnad för frånluftstemperaturreglering, givare, kabel och utökad reglercentral är omkring 2 000 kr
- en frånluftsgivare kan troligen endast användas i väl inreglerade hus med ett stort antal lägenheter per frånluftsflykt
- återkopplingstermen från frånluften kan bestå av endast en proportionell term med hög förstärkning

En ekonomisk utvärdering av resultaten är svår att göra. För detta skulle fordras jämförande experiment under större tidsrymder, något som vi inte haft möjlighet att göra. Nedanstående grova uppskattning av de ekonomiska fördelarna med en bättre temperaturreglering bör därför ses med förbehåll. I en ekonomisk analys kan man inte heller ta med den subjektiva förbättring av klimatet, som husets hyresgäster upplever vid en bättre temperaturreglering.

Enligt uppgift från husets förvaltare, MKB, så förbrukade vårt hus, ett tvillingshus och ett gemensamt garage, 2 400 000 Mcal under tiden 1/7 1975 - 30/6 1976. Energiavgiften uppgick till 106 000:-. Man beräknar att ca 70% av den tillförda energin åtgår till uppvärmning. En tumregel säger att 1 °C temperatursänkning medför 5-7% lägre energiåtgång.

Vid datorreglering av temperaturen har reglerfelet varit mindre än 0.1 °C. Med konventionell reglering fås ett fel på 0.5 °C enligt FIG.2.1. Antagligen är det verkliga reglerfelet betydligt större, då de boende genom vädring kan minska alltför höga inomhustemperaturer.

Med en bättre reglering skulle man antagligen kunna sänka börvärdet för inomhustemperaturen med  $0.5^{\circ}\text{C}$ . Detta torde medföra en minskning av energiåtgången för uppvärmningen med ca 2.5%. För det undersökta huset skulle detta innebära en årlig besparing på drygt 1 800:-. Denna besparing bör sättas i relation till kostnaden för en konventionell utetemperaturstyrd reglering på ca 4 000 kr, och merkostnaden för att förse den med frånluftstemperaturreglering på ca 2 000 kr, omfattande en utökad reglercentral, en givare och kabel.

För övrigt kan man säga att besparingens storlek beror på husets storlek och hur mycket temperaturen varierar.

En intressant uppgift är att låta genomföra en motsvarande undersökning på annan typ av bebyggelse, gärna ett enfamiljshus eller kontorshus.

Som vi har antytt i avsnitt 8 är det ekonomiskt intressant med en bättre temperaturreglering. Det är därför önskvärt att vår föreslagna regulator, se avsnitt 7, kunde implementeras analogt och prövas under längre tid. Regulatorn innehåller en integraldel som kan vara besvärlig att realisera praktiskt. Den kan i så fall kanske ersättas med enbart en proportionell regulator med hög förstärkning. I de använda regulatorerna har P-delens förstärkning varit omkring 40 eller mer. Detta kan tolkas som att vid en frånluftstemperaturökning på  $1^{\circ}\text{C}$  så sänks börvärdet för radiator-tilloppstemperaturen med  $40^{\circ}\text{C}$ . En proportionell regulator har alltid ett proportionellt fel, men med en hög förstärkning så blir felet litet. Om en frånluftstemperaturökning kompenseras med en radiator-tilloppstemperatursänkning på  $10^{\circ}\text{C}$  så blir det stationära felet mindre än  $0.25^{\circ}\text{C}$ .

Under hösten 1977 skall en frånluftsreglerutrustning monteras och provas i det aktuella huset. Medelvärdesbildningen approximeras genom att seriekoppla givarna två och två och därefter parallellkoppla dessa två par.

## 9 REFERENSER

- Elmqvist, H., 1975, Simnon. An interactive simulation program for non-linear systems. Users manual. Report 7502. April 1975. Division of Automatic Control, Lund Institute of Technology.
- Hewlett Packard, 1971. Coupler/controller system model 2570A. Operating and service manual. HP part No.02570-90003.
- Jensen, L., 1973. Ett coupler/controllersystem. Arbetsrapport 1973:6. Institutionen för Reglerteknik, Lunds Tekniska Högskola.
- Jensen, L., 1974. Computer programs for fullscale experiments. Report 1974:13. Division of Automatic Control, Lund Institute of Technology.
- Lange, E., 1976. Energianvändning och energiproduktion i höghus i Malmö. Delrapport 1. Rapport BKL 1976:1. Institutionen för Byggnadskonstruktionslära, Lunds Tekniska Högskola.
- Leden, B., 1974. Programutveckling och PID-reglering. Institutionen för Reglerteknik, Lunds Tekniska Högskola.
- Lehrmann Madsen, J.,. Väderkompenserad reglering av tilloppstemperaturen.
- Statens Planverk, 1976. Energisparmöjligheter i befintlig bebyggelse - preliminär rapport. DNR B1719/76.
- Wieslander, J., 1976. Idpac user's guide. Revision 1. Report 7605. April 1976. Division of Automatic Control, Lund Institute of Technology.

Tabell 1. Bostadsbeståndet i antal lägenheter

Källa: Preliminära uppgifter från FoB 1975.

Byggnadsår	SMÅHUS		FLERBOSTADSHUS		TOTALT	
	1000 lgh	%	1000 lgh	%	1000 lgh	%
Före 1931	518	35	290	14	808	23
1931-1950	314	21	466	23	780	22
1951-1975	638	44	1305	63	1943	55
Summa	1470	100	2061	100	3531	100

Tabell 4. Bostadslägenheter (1000-tal) fördelade på uppvärmningsform år 1975

Källa: FoB 1975, SCB: El- och fjärrvärmeförsörjningen 1975 (Iv 1976: 7.40)

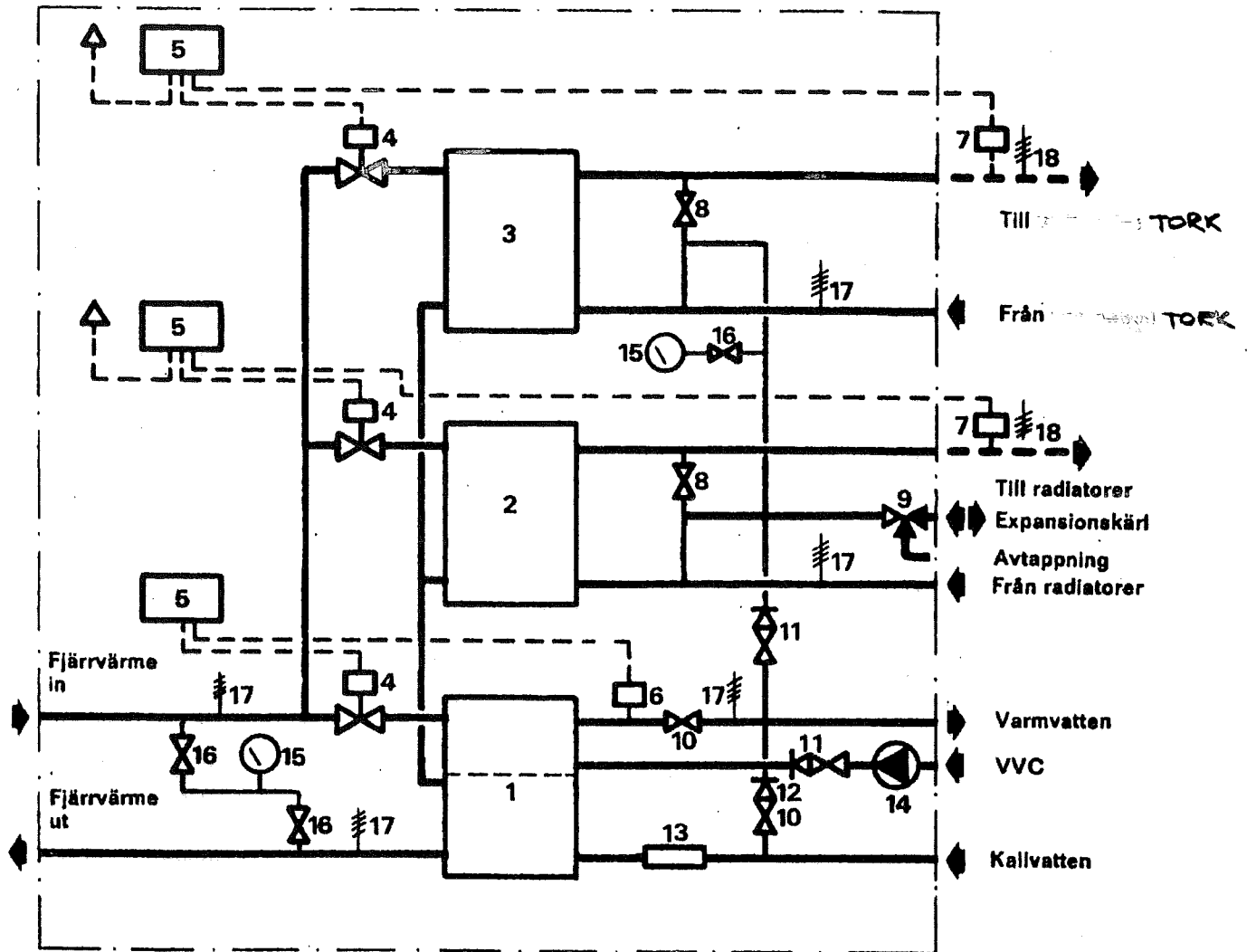
	Antal lgh (1000) i småhus	Antal lgh (1000) i flerbostadshus
Fjärrvärme	32	717
Oljepanna	1119	1288
Elvärme	332	42
Totalt	1483	2047

Tabell 11. Nettoenergiförbrukningen i bostäder

Källa: Byggforskningen T 6:1976.

Byggnadsår	Bostadsyta m <sup>2</sup>	Trans- missions- yta m <sup>2</sup>	Netto- energi- åtgång kWh	Därav i % för				Netto- energi- förbruk- ning kWh
				väggar, golv, tak fönster	venti- la- tion	varm- vatten	hus- hålls- el	
<u>Småhus</u>								
Före 1941	95	230	34000	59	19	12	10	30000
1941-1960	100	250	30000	55	20	13	12	26000
1961-1970	115	300	29500	51	20	17	12	25000
<u>Flerbostadshus</u>								
Före 1941	60	80	21500	48	23	16	13	20000
1941-1960	57	76	19000	43	24	18	15	17000
1961-1970	69	80	18000	37	25	22	16	16000

Skillnaden mellan nettoenergiåtgången och nettoenergiförbrukningen (4000-4500 kWh i småhus och 1500-2000 kWh i flerfamiljshus) består av gratisvärme från solinstrålning, hushållsel, personer m m.



- |                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| 1. Värmeväxlare varmvatten            | 10. Avstängningsventil                        |
| 2. Värmeväxlare radiatorer            | 11. Avstängningsventil med inbyggd backventil |
| 3. Värmeväxlare                       | 12. Backventil                                |
| 4. Styrventil                         | 13. Ventilrör med säkerhets- och vakuumentil  |
| 5. Reglercentral                      | 14. VVC-pump                                  |
| 6. Dykgivare                          | 15. Tryckmätare                               |
| 7. Dykgivare, levereras lösa          | 16. Nålventil med kontrollfläns               |
| 8. Reglerventil med tryckmätningsslag | 17. Temperaturmätare                          |
| 9. Växventil                          | 18. Temperaturmätare, levereras lösa          |
|                                       | Leveransgräns                                 |

### Arbetsätt

Fjärrvärmecentralens funktion framgår av principschema, fig. 5. Ingående fjärrvärmevatten regleras av styrventilerna 4. Hetvattenreturen från radiator- och ventilationskretsarna leder till varmvattenberedarens förvärmardel och värmer inkommande kallvatten. Förvärmardelen är dimensionerad så att detta flöde räcker till medelstora varmvattentappningar. Vid störtappning på förbrukningsvarmvattensidan eller då returen från radiator- och ventilationskretsarna inte har tillräckligt hög temperatur, d.v.s. på sommaren, leds primavärme från fjärrvärmenetet via styrventilen direkt in i varmvattenberedarens eftervärmardel, där det möter redan förvämt varmvatten. Inkommande kallvatten går alltså i två seriekopplade kretsar internt i beredaren, där det först värms av hetvattenreturen från radiator- och ventilationskretsarna och därefter

av primavärme från fjärrvärmenetet. VVC-ledningen kopplas till varmvattenberedarens eftervärmare.

Reglering av radiator- och ventilationskretsarna sker på konventionellt sätt med styrventiler som via reglercentraler påverkas av dykgivare, placerade i stigarledningarna och av utomhusgivare. Radiatorkretsens reglercentral kan förses med dygnprogramur för sänkning av nattemperaturen i kretsen.

På sekundärsidan är ingående kallvattenledning via en avstängningsventil och en backventil ansluten till utgående förbrukningsvarmvattenledning. Härigenom förses de varma tappställena med kallvatten då varmvattenberedaren inspekteras eller rengörs. För påfyllning av vatten i radiator- och ventilationskretsarna är utgående förbrukningsvarmvattenledning via en avstängningsventil och en backventil ansluten till denna krets. Här finns också anslutningspunkt för expansionskärl.