VÄRMEFORSK
STIFTELSEN FÖR VÄRMETEKNISK FORSKNING

Dynamisk provning av värmeväxlare med hjälp av processindelning

Håkan Wallentun
Bengt-Göran Bergdahl
Bernt Oddving

HETVATTENTEKNIK 365

1989-05-31
Rev 1989-11-20

Håkan Walletun, Studsvik Energy
Bengt-Göran Bergdahl, Studsvik Nuclear
Bert Oddving, Studsvik Energy

RESULTAT FRÅN DYNAMISK PROVNING AV VÄRMEVÄXLARE MED HJÄLP AV PROCESSIDENTIFIERING

Huvudinnehåll

STUDSVIK AB har på uppdrag av Värmeverksföreningen byggt upp en provkrets för funktionsprovning av värmeväxlare för fjärrvärmetillämpningar. Provningen har pågått sedan 1986 och ca 60 olika värmeväxlare har hittills testats och utvärderats.

Syftet med detta projekt har varit att i första hand ta fram förutsättningar för en komplettering av det idag gällande provprogrammet med ett dynamiskt avsnitt som praktiskt kan tilllämpas vid provning på tappvarmvatten-VVX. Det har också gällt att finna de mätbara mått, t ex tidskonstanter, som skall kunna beskriva en värmeväxlares dynamiska uppförande.

Som mätprincip har i undersökningarna använts processidentifiering baserad på brusanalys. Mätprincipen har visat sig fungera mycket bra och ger noggranna och reproducerbara resultat. Det förefaller som om mätprincipen mycket väl kan användas även vid andra mer generella dynamiska studier.

Rapporten redovisar uppnådda resultat samt presenterar ett förslag till provprogram för funktionsprovning av tappvarmvatten-VVX.

Projektet har varit finansierat av Värmeverksföreningen, Statens Energiverk och Stiftelsen för Värmeteknisk Forskning.

ISBN 91-7010-105-1

© STUDSVIK AB, Sweden 1989.

Godkänd av

STUDSVIK AB

STUDSVIK/ED-89/15

1989-05-31

Håkan Walletun, Studsvik Energy
Bengt-Göran Bergdahl, Studsvik Nuclear
Bert Oddving, Studsvik Energy

RESULTS FROM DYNAMIC TESTS OF HEAT EXCHANGERS USING PROCESS IDENTIFICATION

Summary

STUDSVIK AB has on behalf of The Swedish District Heating Association built a test circuit for functional testing of heat exchangers used in district heating. The test program has been in operation since 1986 and about 60 different heat exchangers have been evaluated.

The purpose of this project is primarily to find conditions to complement the present test program with a dynamic one for practical use at tap water heat exchanger tests. Another purpose has been to find measurable variables, i e time constants, to be able to describe the dynamic performance of a heat exchanger.

The measurement principle during the investigations has been process identification based on noise analysis. The principle has proved itself sucessful and gives accurate and reproducable results. It seems that the measurement principle is also well suited to be used with more general dynamic studies.

The report presents the dynamic test results and includes a modified program for functional testing of tap water heat exchangers.

The project has been financially supported by
The Swedish District Heating Association,
The Swedish National Energy Administration and
The Thermal Engineering Research Institute.

ISBN 91-7010-105-1

© STUDSVIK AB, Sweden 1989.

Approved by

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

		Sid
1	Bakgrund	4
2	Syfte	4
3	Beskrivning av mätutrustning	5
4	Beskrivning av mätprincip	6
5	Mätresultat	9
6	Teoretisk studie	12
7	Analys	13
8	Provprogram för vattenvärmare	18
9	Slutsatser	19
10	Erkännanden	20

Bilaga 1
Allmänt om processidentifiering

1 Bakgrund

STUDSVIK AB har på uppdrag av Värmeverksföreningen byggt upp en provkrets för funktionsprovning av värmeväxlare för fjärrvärmetillämpningar. Provningen har pågått sedan 1986 och ca 60 olika värmeväxlare har hittills testats och utvärderats.

Målsättningen med provverksamheten är att undersöka värmeväxlare i temperaturprogram som väl skall motsvara reella driftfall i fjärrvärmesammanhang. Av denna anledning har både dimensioneringsfall och dellaster studerats.

Vid den hittills genomförda provningen har värmeväxlarens statiska egenskaper testats där fastställda temperaturer, vätskeflöden samt värmeeffekt uppnåtts efter en viss provtid. Registrerade mätvärden har sedan avstämts mot tillverkarens egna beräknade data. Värmeväxlarens prestanda har genom denna provmetodik kunnat kontrolleras på ett noggrannt och reproducerbart sätt. Provprogrammet och provriggen finns beskrivna i ref. /1/ och /2/.

2 Syfte

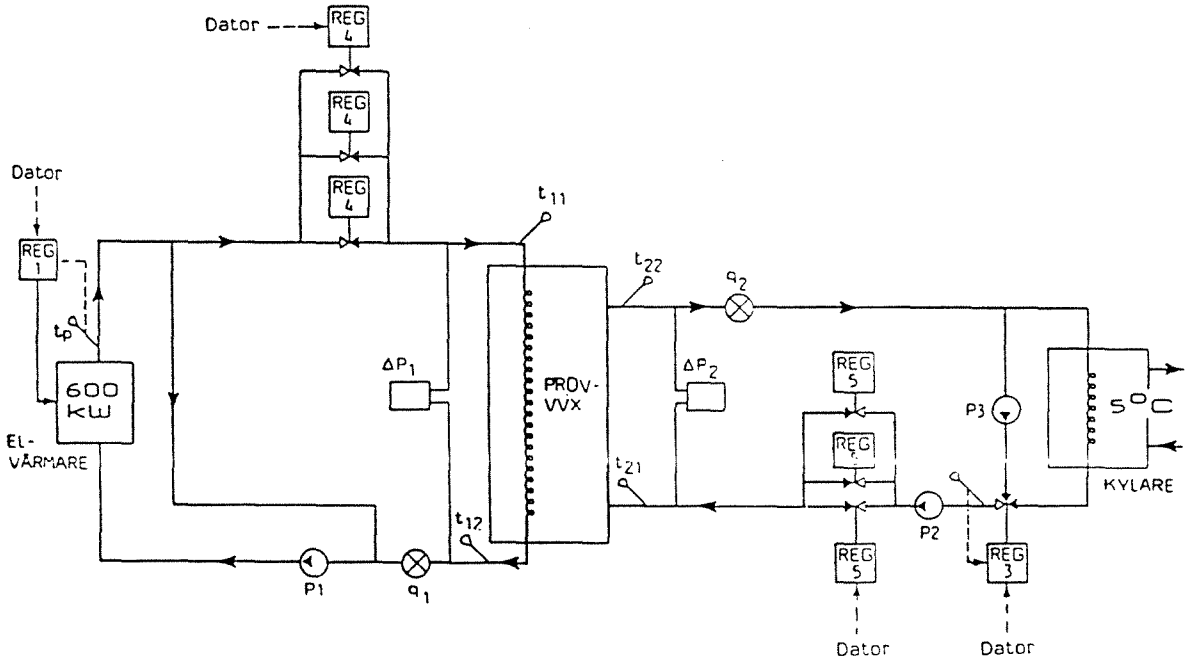
Den hittills använda statiska provformen beskriver väl den verkliga driftsituationen för radiatorvärmeväxlare, medan den egentligen inte alls speglar den verkliga driftsituationen för s k vattenvärmare. Där sker i verkligheten istället effektuttaget över värmeväxlaren nära nog slumpmässigt och framförallt under mycket korta tidsperioder. Det betyder att vattenvärmaren används på ett helt annat sätt än radiatorvärmeväxlaren med allt annat än statiska driftsituationer.

Syftet med detta projekt är att i första hand komplettera det idag gällande provprogrammet med ett dynamiskt avsnitt som praktiskt kan tillämpas vid provning på tappvarmvatten-VVX. Det gäller också att finna de mätbara mått, t ex tidskonstanter, som skall kunna beskriva en värmeväxlares dynamiska uppförande. Precis som vid den tidigare provningen är det viktigt att använda en metodik som kan visa på både styrka och svaghet i en VVX-konstruktion.

3 Beskrivning av mätutrustning och VVX

3.1 Mätutrustning

Mätningarna har genomförts vid Studsvik i en provrigg avsedd för test av värmeväxlare, se figur 1. Via elvärmaren tillförs den termiska effekten till det cirkulerande vattnet i riggens primärkrets. På sekundärsidan bortförs effekten med en kylare som är kopplad till det centrala saltvattenkylsystemet. Mätutrustningen finns beskriven i detalj i ref. /1/ och /2/. Temperaturmätningarna t11, t12, t21 och t22 har skett direkt vid värmeväxlarens anslutningar.



Figur 1
Värmeväxlarprovkrets.

I kretsen har följande givare använts vid mätningarna:

tp	Temperatur ut ur elpannan	(°C)
t11	Ingående temperatur på primärsida	(°C)
t12	Utgående temperatur på primärsida	(°C)
q1	Volymflöde på primärsida	(l/s)
t21	Ingående temperatur på sekundärsida	(°C)
t22	Utgående temperatur på sekundärsida	(°C)
q2	Volymflöde på sekundärsida	(l/s)

3.2 Värmeväxlare

Två värmeväxlare av olika typ har använts vid provningarna. Anledningen har varit att undersöka om några skillnader i det dynamiska beteendet kan hänföras till olika värmeväxlarkonstruktioner.

Den ena värmeväxlare är en rör-värmeväxlare av fabrikat CTC SKR-84-1.5. Värmeväxlaren har varit ansluten med tubsidan till primärkretsen och mantelsidan till sekundärkretsen. Enligt CTC's datablad har batteriet en volym av 12.5 liter och mantelsidan en volym av 70 liter.

Den andra värmeväxlaren som undersökts består av två seriekopplade lödda plattvärmeväxlare av fabrikat Zander & Ingeström CBH25-100H. Enligt märkningen på värmeväxlaren har både primär- och sekundärsidan en volym av 2 * 4.95 liter, dvs totalt 9.9 liter på vardera sidan.

4 Beskrivning av mätprincip

Som mätprincip har i undersökningarna använts processidentifiering baserad på brusanalys, se bilaga 1 och ref. /3/. Provmetodiken som använts i denna undersökning finns beskriven i detalj i ref. /4/.

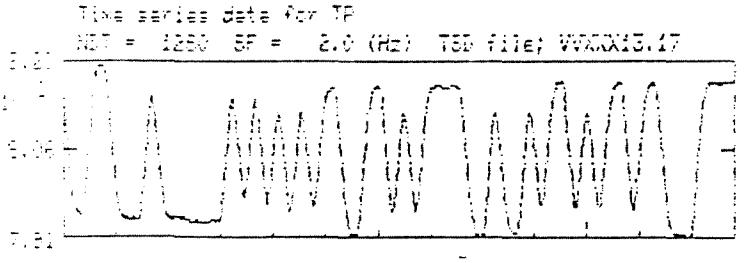
När processidentifiering tillämpas i praktiska sammanhang kan vanligen det naturliga bruset i processen användas. I de fall där processbruset är för litet kan välkontrollerade störningar tillföras processen och därmed göra mät- och analystekniken användbar. Den typ av störsignal som mest används för denna uppgift är PRBS (Pseudo Random Binary Sequence). Signalen är sådan till sin karaktär att den skiftar mellan två signalnivåer med ett förutbestämt tidsmönster. PRBS-signalen har väldefinierade och repeterbara statistiska egenskaper, se ref. /5/.

I provriggen som använts för mätningarna har det naturliga bruset bedömts vara för litet. I samtliga försök har därför en PRBS-signal tillförts processen. I flertalet försök har PRBS-signalen tillförts styrsignalen till elvärmaren, vilket har resulterat i en effektvariation mellan två valda nivåer (t ex 100 ± 10 kW). Då provpunkterna genomförts med konstanta vätskeflöden har effektvariationerna direkt resulterat i temperaturvariationer. Temperaturen ut från elpannan (tp) har i ett visst skede varierat enligt figur 2a. I figurerna visas relativa temperaturförändringar och ej absoluta temperaturer.

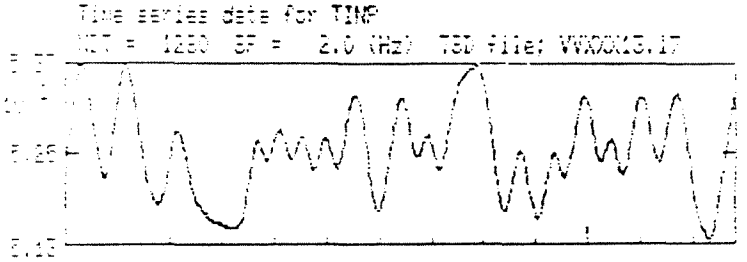
I figur 2b visas temperaturen in till VVX primärsida (**t11**). Som synes liknar profilen starkt panntemperaturen (**tp**). Skillnaden är den tidsfördröjning som vätsketransporten från en givare till nästa givare ger upphov till. Dessutom har de skarpa flankerna vid **tp** blivit mer avrundade vid **t11** beroende på uppblandning i vätskan.

I figur 2c visas hur temperaturen ut från VVX på sekundärsidan (**t22**) också har ett mönster som liknar **tp**. Här har dock värmeväxlarens dynamik ytterligare påverkat signalen samt blandningsförloppen på sekundärsidan.

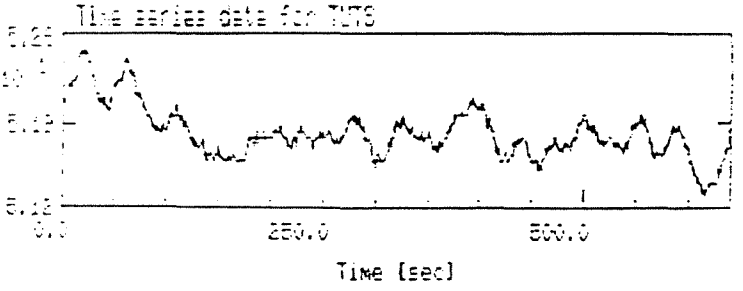
Inkommande temperatur på sekundärsidan (**t21**) har vid samtliga försök hållits nära nog konstant vid ca 5°C.



Figur 2a
Temperaturvariationer ut ur elpannan.



Figur 2b
Temperaturvariationer in till VVX primärsida.



Figur 2c
Temperaturvariationer ut ur VVX sekundärsida.

Värmeeffekten på primär- resp sekundärsidan (P1 och P2), beräknas enligt följande ekvationer som ett samband mellan differenstemperatur och flöde:

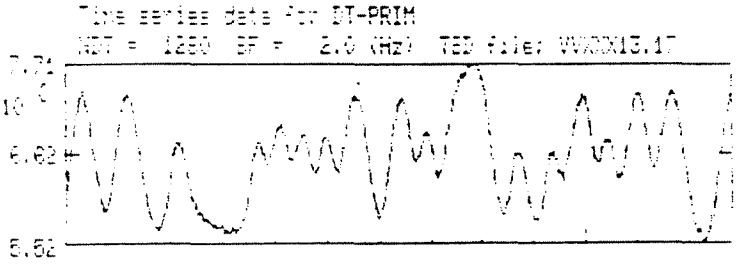
$$P1 = (t11-t12) * q1 * konst(t) \quad (1)$$

$$P2 = (t22-t21) * q2 * konst(t) \quad (2)$$

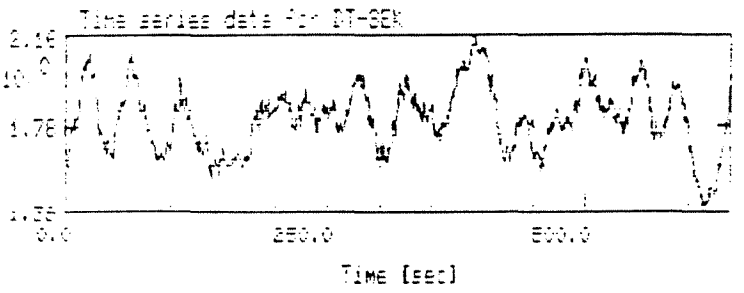
Eftersom vi i våra försök valt att i varje mätpunkt hålla vätskeflödena konstanta är differenstemperaturerna direkt proportionella mot effekten och dynamikundersökningen kan förenklas till att studera sambandet mellan dessa.

Differenstemperaturerna för primär- resp sekundärsidan bildas matematiskt i datorn, se figur 3a-b, och används sedan i processidentifieringsprogrammet. I den av datorn identifierade modellen kan sedan verkan av en stegstörning undersökas och tidskonstanten kan bestämmas. Tidskonstanten för modellen bestäms då utsignalen nått 63% av slutvärdesnivån.

När vi i detta sammanhang talar om tidskonstant avses den tidsfördröjning som uppstår i värmeöverföringen från primär till sekundär sida av VVX p g a givna driftparametrar. Vi har i denna försöksserie valt att arbeta med differenstemperaturerna, men man kan lika väl definiera tidskonstanten utifrån variablerna t11 och t22.



Figur 3a
Differenstemperatur t11-t12 på VVX primärsida.



Figur 3b
Differenstemperatur t22-t21 på VVX sekundärsida.

5 Mätresultat

Vi har i vårt antagande förutsatt att följande parametrar kan påverka våra registrade tidskontanter för processen (=värmeväxlaren):

- Värmeväxlarens temperaturberoende
- Värmeväxlarens flödesberoende
- Temperaturgivarnas responstid.

Värmeväxlarens temperaturberoende kan dels uttryckas i temperaturnivåer (t ex medeltemperaturerna på resp sida) eller dels i logaritmisk medeltemperaturdifferens LMTD.

$$LMTD = \frac{(t11-t22) - (t12-t21)}{\ln((t11-t22)/(t12-t21))} \qquad (3)$$

Värmeväxlaren flödesberoende kan uttryckas i den totala värmeöverföringskoefficienten k, vilken i sin tur påverkas primär- och sekundärsidans vätskeflöden. Produkten av k och den värmeöverförande ytan A kan uttryckas som:

$$k * A = \frac{\text{Effekt}}{LMTD} \qquad (4)$$

Ett annat sätt att uttrycka flödesbeorendet kan göras genom att använda uppehållsstiderna för vätskevolymerna på resp sida i VVX. Uppehållstiderna τ_1 och τ_2 skrivs som:

$$\tau_1 = \frac{V1}{q1} \quad \text{och} \quad \tau_2 = \frac{V2}{q1} \qquad (5)$$

I litteraturen används ibland parametern τ_d^* (kvoten av primär och sekundär uppehållstid) som ett sätt att uttrycka värmeväxlarens flödesberoende. Ytterligare ett sätt är att vikta uppehållstiderna τ_1 och τ_2 och bilda kvoten t_{wc} enligt

$$t_{wc} = \frac{\tau_1 * \tau_2}{\tau_1 + \tau_2} \qquad (6)$$

5.1 Dynamikresultat för CTC-värmeväxlaren

För CTC-värmeväxlaren har totalt 9 olika mätpunkter undersökts. Mätresultat redovisas i tabell 1.

Tabell 1.

Nr	q1 (l/s)	q2 (l/s)	LMTD (°C)	Medel-effekt (kW)	Tidkonst. (s)	τ_d^*	t_{wc} (s)
1	3.0	8.0	6.7	400	4.1 ± 0.2	0.48	2.8
2	2.8	8.0	2.2	100	4.3 ± 0.4	0.51	3.0
3	3.0	8.0	7.8	500	4.1 ± 0.1	0.48	2.8
4	3.0	8.1	7.7	500	4.2 ± 0.1	0.48	2.8
5	2.2	8.1	9.3	400	4.9 ± 0.4	0.66	3.5
6	1.4	8.1	14.0	400	4.8 ± 0.6	1.03	4.4
7	2.1	5.2	8.2	400	7.0 ± 0.4	0.44	4.1
8	1.4	3.5	11.2	400	9.8 ± 1.1	0.45	6.3
19	0.7	8.1	8.6	100	9.3 ± 0.7	2.07	5.7

5.2 Dynamikresultat för Z & I-värmeväxlaren

För Z & I-värmeväxlaren har totalt 11 olika mätpunkter undersökts. Resultaten visas i tabell 2.

Tabell 2.

Nr	q1 (l/s)	q2 (l/s)	LMTD (°C)	Medel-effekt (kW)	Tidkonst. (s)	τ_d^*	t_{wc} (s)
9	2.7	3.3	8.0	400	3.1 ± 0.0	1.22	1.7
10	2.7	1.6	13.4	400	6.1 ± 0.2	0.59	2.3
11	2.7	0.8	27.7	400	15.1 ± 1.2	0.30	2.8
13	1.6	3.1	3.4	100	4.6 ± 0.1	1.94	2.1
14	1.6	1.5	8.2	100	7.9 ± 0.2	0.94	3.2
15	1.6	0.7	14.8	100	16.4 ± 0.1	0.44	4.3
16	0.7	3.1	7.9	100	4.2 ± 0.3	4.43	2.6
17	0.7	1.5	16.6	100	6.2 ± 0.3	2.14	4.5
18	0.7	0.7	28.0	100	12.9 ± 0.1	1.00	7.2
20	2.7	3.1	1.4	100	4.8 ± 0.0	1.15	1.7
12	1.6	3.2	2.5	100	5.1		

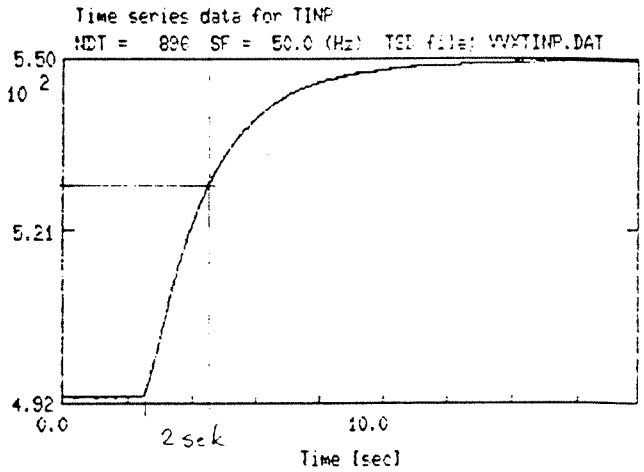
5.3 PRBS-variation av flödet

I mätpunkt 12 har PRBS-signalen tillförts primärflödet q1 som varierat i intervallet 1.3 - 1.8 l/s medan tillförd eleffekt och sekundärflöde istället varit konstanta. Den skall jämföras med mätpunkt 13 som är motsvarande driftfall i den övriga mätserien. Skillnaden i uppmätt tidskonstant kan förklaras dels p g a skillnader i responstid för temperaturgivare och flödesmätare, dels p g a skillnader i LMTD vid de båda provpunkterna.

Slutsatsen blir att det snarare är enklare att arbeta med PRBS-signalen på tillförd eleffekt än på primärflödet.

5.4 Temperaturgivarnas responstid

För att bestämma responstiden hos de temperaturgivare som använts har ett separat prov genomförts. Temperaturgivarna t11, t12, t21 och t22 har växelvis placerats under rinnande kallt resp varmt vatten. Tiden mellan växlingarna har varit ca 30 sekunder. Resultatet av undersökningen framgår av figur 4 där responstiden för givaren bestämts då signalen nått 63% av slutvärdesnivån samt i tabell 3.



Figur 4
Bestämning av responstiden för givare t11.

Tabell 3
Responstid för de givare som använts i försöken.

Givare	Responstid (s)
t11	2.0
t12	2.0
t21	2.8
t22	2.8

Det kan vid en första anblick verka äventyrligt att bestämma dynamiken hos ett objekt med tidskonstanten 4 sekunder när de sensorer som används har svarstider på 2 - 3 sekunder. Det är naturligtvis ingen idealisk situation, men nu är det emellertid så att värmeväxlarnas tidskonstanter har beräknats med hjälp av differenstemperaturerna på primär- resp sekundärsidan. Eftersom givarnas dynaik kan ses som en tidsfördröjning så påverkas resultatet enbart av den differens som föreligger mellan de två paren av givare, dvs 0.8 sekunder.

6 Teoretisk studie

Vid undersökning av transienta förlopp i en värmeväxlare innebär det oftast att man önskar bestämma det ena eller båda mediernas utgående temperaturer som funktion av tiden vid en pålagd momentan förändring i massflödet eller ingående temperatur för endera mediet. Ett beskrivande exempel är, som tidigare nämnts, olika driftfall för en vattenvärmare som utsätts för varierande tappningar vid olika tider på dygnet.

Den matematiska analysen av detta problem, är som framgår av ett flertal artiklar i litteraturen t ex ref. /6/ och /7/, tämligen komplicerad. Vanligen tvingas man använda LaPlace-transformation vid lösningen av differentialekvationerna, varvid bildandet av olika dimensionlösa tal underlättar lösningarna och resultatpresentationerna.

Lösningarna är i allmänhet av formen:

$t_h^*, t_c^* = f(X^*, N_{tu}, C^*, s^*, R^*, C_w^*, s_d^*)$ där

X^* = Dimensionslös "Flow length variable",

$N_{tu} = (k * A)/C$ = "Number of heat transfer units",

C^* = Kvoten mellan vätskornas värmekapacitet,

s^* = Dimensionslös tidsvariabel,

R^* = Kvoten mellan värmeövergångsmotstånden,

C_w^* = Värmeytans värmekapacitet/primärvätskans värmekapacitet,

s_d^* = Kvoten av primär och sekundär uppehållstid.

De tre första termerna kan härröras till statiska driftfall medan de fyra sista termerna är kopplade till transienta förlopp. t_h^* och t_c^* är en dimensionlös relativ temperaturändring på den varma eller kalla sidan av värmeväxlaren..

I litteraturen presenteras lösningarna ofta i form av olika diagram för specialfall, t ex $C^* = 1$, d v s samma vätska på primär- och sekundärsidan eller för $R^* = 1$ d v s samma värmeövergångstal på båda sidor.

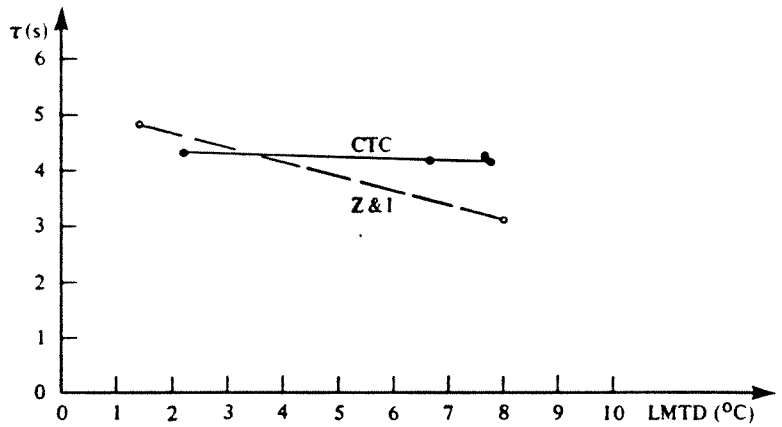
Genom en kombination av diagram och kända fysikaliska data på den CTC-värmeväxlaren som använts i dessa prov har överslagsberäkningar gjorts som visar att några olika driftfall som motsvarar genomförda försök ger tidskonstanter på 5 - 8 sekunder, vilket stämmer väl med uppmätta värden i tabell 1.

7 Analys

7.1 Värmeväxlarnas temperaturberoende

Om vi för CTC-VVX jämför mätpunkterna 1-4 (se tabell 1) har dessa genomförts vid ungefär samma vätskeflöden men med olika effektnivåer, dvs olika temperaturdifferenser och även olika LMTD, om än med måttliga variationer. Man ser att mätpunkt 2 med lägst LMTD har störst tidskonstant, vilket är att förvänta om LMTD fungerar som drivkraft för värmeöverföringen. I dessa temperaturområden finns dock inget nämnvärt temperaturberoende för tidskonstanten, se figur 5.

Om vi för Z&I-VVX gör motsvarande jämförelse med mätpunkterna 9 och 20 (se tabell 2) har dessa genomförts vid ungefär samma vätskeflöden men med olika effektnivåer. Här är det en större skillnad i variation av LMTD än vad som var fallet med CTC-VVX, vilket också har resulterat synbar påverkan i tidkonstanten för VVX. En minskning av LMTD från 8.0°C till 1.4°C har gjort att tidkonstanten ökat från ca 3.1 sekunder till ca 4.8 sekunder.



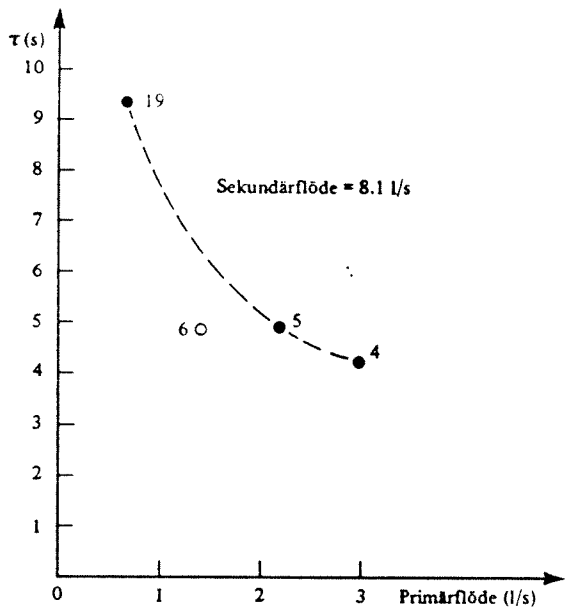
Figur 5
Tidskonstanternas påverkan av olika LMTD.

7.2 Värmeväxlarnas flödesberoende

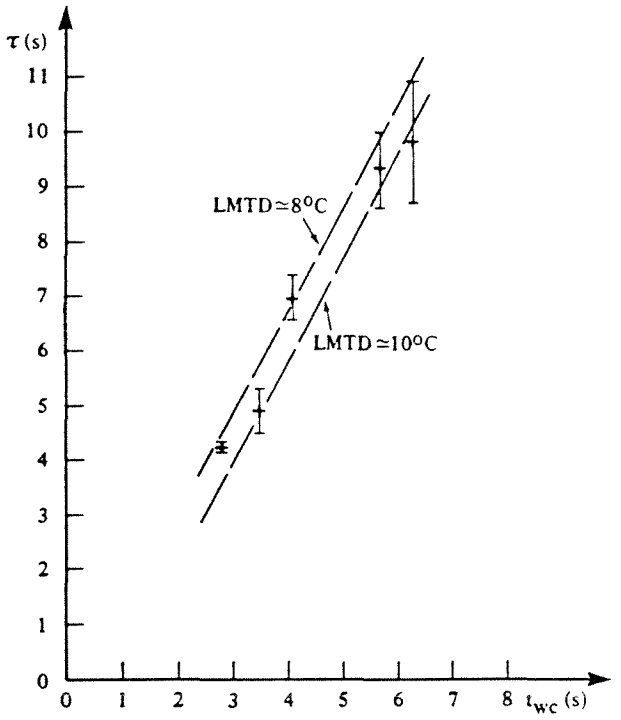
I figurerna 6a-c har CTC-värmeväxlarens påverkan av olika vätskeflöden redovisats på tre olika sätt. Figur 6a visar fyra mätpunkter med konstant flöde på sekundärsidan. Flödet på primärsidan har varierats från 0.7 l/s till 3.0 l/s. För tre av mätpunkterna har värmeväxlarens temperaturpåverkan varit lika (ungefär samma LMTD), medan den fjärde mätpunkten har ett större LMTD vilket ger en kortare tidskonstant och därmed en avvikelse från de övriga punkternas kurva. För mätpunkten med lägst flöde finns risk för att laminärt flöde uppstått, vilket kan förklara den drastiska ökningen i tidskonstant.

Figur 6b visar fem mätpunkter i ett diagram beskrivande tidskonstanten som funktion av parameten t_{WC}.

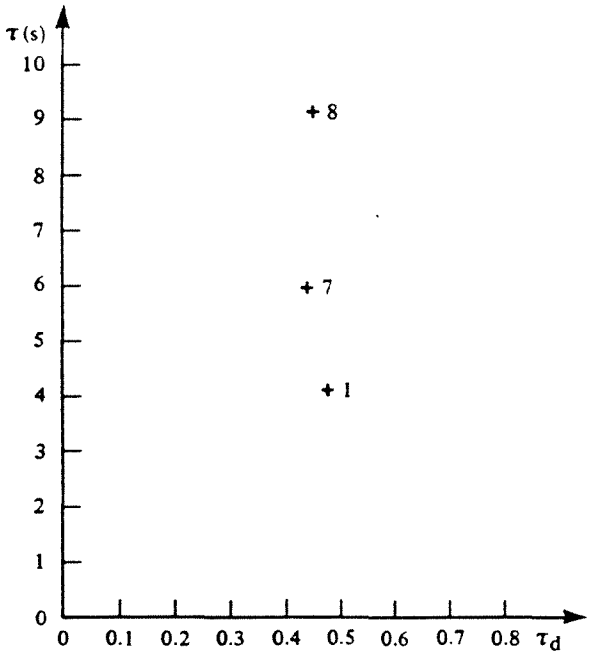
I figur 6c slutligen visas tidskonstanten som funktion av kvoten mellan primärt och sekundärt flöde.



Figur 6a
Tidskonstant som funktion av olika primärflöden.



Figur 6b
Tidskonstant som funktion av parametern t_{wc}.

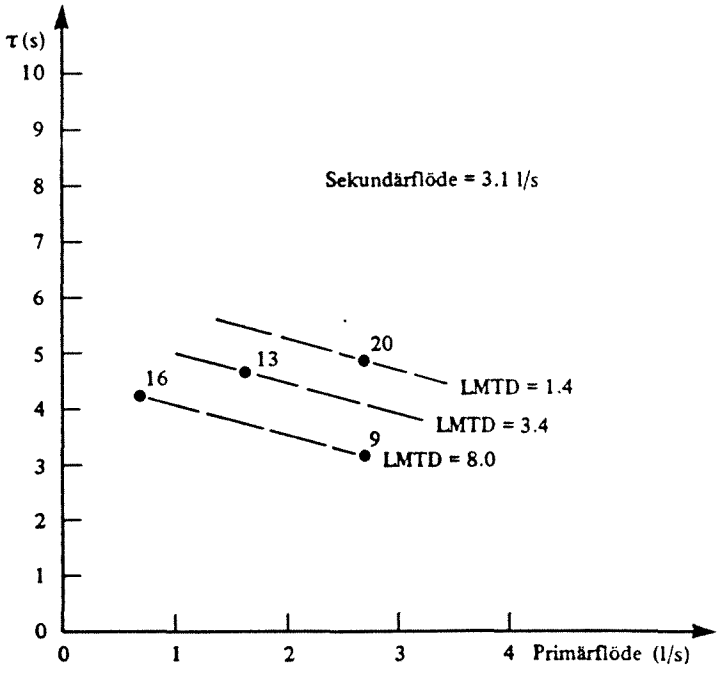


Figur 6c
Tidskonstant som funktion av kvoten mellan primärt och sekundärt flöde.

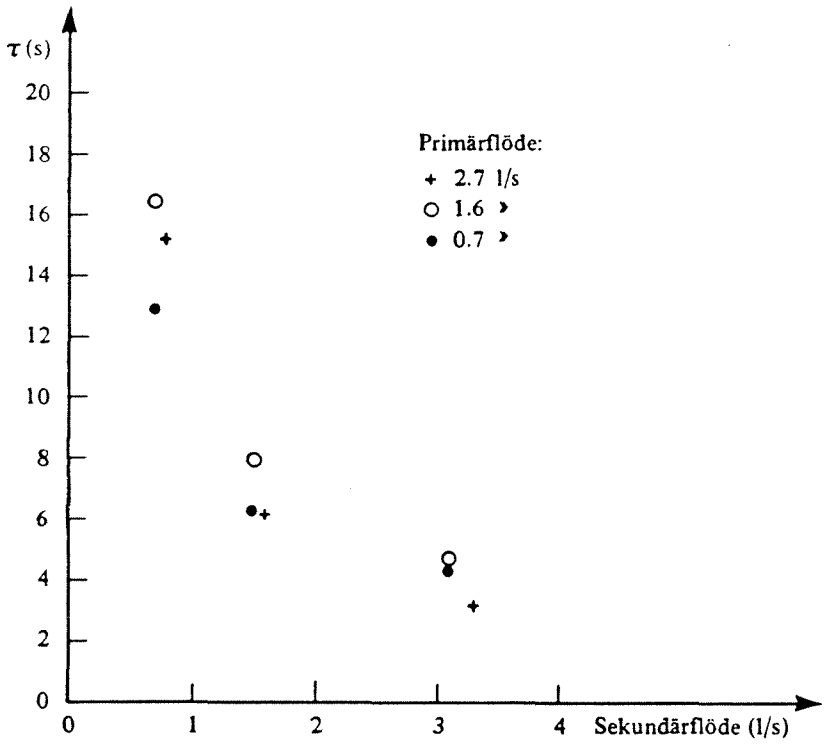
I figur 7a-b visas Z&I-värmeväxlarens påverkan av olika vätskeflöden. Figur 7a visar fyra mätpunkter med konstant flöde på sekundärsidan. Mätpunkt 9 och 16 har samma LMTD och uppvisar för genomförd flödesändring på primärsidan en skillnad i tidskonstant från 3.1 till 4.2 sekunder. Mätpunkt 13 och 20 har en mindre LMTD och får trots högre flöde än mätpunkt 16 en större tidskonstant. Tidskonstantens påverkan av temperaturen är klart märkbar.

Figur 7b visar istället mätpunkterna vid varierande flöde på sekundärsidan. Noterbart är att den lödda plattvärmeväxlaren för de låga flödena har en så hög tidskonstant som 15 sekunder. En orsak kan möjligen vara att laminärt flöde uppstått.

Tyvärr har provpunkterna för Z&I-värmeväxlaren genomförts med relativt stora variationer i LMTD vilket innebär att det är svårt att renodla fallen med ren flödespåverkan.



Figur 7a
Tidskonstant som funktion av olika primärflöden.



Figur 7b
Tidskonstant som funktion av olika sekundärflöden.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att det föreligger en relativt stor spridning i värmeväxlarnas tidskonstanter. Detta styrker också vad man kan förvänta sig utifrån kända fakta om ickestationära förhållanden för värmeväxlare. Det är dock inte entydigt att avgöra vad som är bra eller dåligt med lång/kort tidskonstant. I vissa fall är det nödvändigt med kort responstid för att kunna uppfylla t ex komfortkrav vid tappning av varmvatten. I andra sammanhang kan det vara en fördel med längre tidskonstanter, vilket då kan fungera dämpande och medföra bättre regleregenskaper i t ex en abonnentcentral.

Dessa problem visar på betydelsen av att känna till hur värmeväxlaren och de övriga komponenterna i processen reagerar vid olika statiska, men även dynamiska, driftfall. Framförallt gäller detta vi dimensionering och val av komponenter i t ex en abonnentcentral samt vid injustering av reglerutrustningar i både nya och befintliga anläggningar.

8 Provprogram för vattenvärmare

Utifrån de erfarenheter som vunnits i detta projekt föreslås en modifiering av det idag gällande provprogrammet för vattenvärmare.

Provprogrammet bör även i fortsättningen innehålla en statisk provdel, men denna reduceras till enbart en provserie med 4-5 provpunkter som täcker in dimensionerande lastfall (100%), maximalt lastfall (120%) och dellaster (t ex 25% och 50%). Som framledningstemperatur föreslås 65°C då denna temperatur förekommer vid ett stort antal drifttimmar över ett år.

- Inkommande framledningstemperatur t11 skall vid alla provpunkterna vara 65°C.
- På sekundärsidan skall inkommande kallvattentemperatur t21 vara 5°C.
- Utgående tappvarmvattentemperaturen t22 skall vara 50°C.

Därtill kommer en dynamisk provdel med 3-4 provpunkter i vilka värmeväxlarens tidskonstanter mäts upp vid de flödesfall som kan bli aktuella i vid verklig drift. T ex vid 120%, 100% och 25% av nominellt tappvattenflöde. Dessa tre provpunkter genomförs vid ovan angivna temperaturer. Därtill bör åtminstone en provpunkt registreras vid motsvarande vinterfall med 100°C eller 120°C som framledningstemperatur. Anledningen är att man då har en större logaritmisk medeltemperaturdifferens vilket i sig ger en mindre tidskonstant, men driftfallet som sådant är också svårare att reglera beroende på större temperaturdifferenser som uppstår över VVX.

Erfordlig provtid för det dynamiska momentet, bedöms till ca 1 timma per provpunkt när proven kommer att genomföras rutinmässigt inom det ordinarie provprogrammet.

Med kännedom om provobjektets tidskonstant för några "typiska" driftfall finns utökade möjligheter att finna bästa möjliga funktion för värmeväxlare och reglerutrustning i en abonnentcentral. Det blir t ex lättare att ställa in reglerutrustningens parametrar om provobjektets tidskonstanter i olika driftfall är kända.

9 Slutsatser

* Processindentifiering baserad på brusanalys fungerar mycket bra som mätprincip vid dynamiska studier av värmeväxlare. Mätmetoden är praktiskt tillämpbar samt ger noggranna och reproducerbara resultat.

* Det ordinarie provprogrammet för vattenvärmare föreslås i fortsättningen innehålla en dynamisk provdel där 3-4 driftfall undersöks. Driftfallen skall täcka dimensionerande punkt, maximala flöden samt även små flöden.

* Som resultat av de dynamiska mätningarna fås värme växlarens tidskonstant vid olika driftfall. Tidskonstanten förefaller vara ett lämpligt mått som beskriver värmeväxlarens dynamiska uppförande. Den na kan uttryckas som funktion av temperatur (t ex LMTD) eller flöde (t ex k * A-värde, uppehållstide etc).

* Med kännedom om värmeväxlarens tidskonstant vid några ofta förekommande driftfall ges utökade möjligheter att finna bästa möjliga funktion för värmeväxlare och reglerutrustning tillsammans i en abonnentcentral.

* Det är enklare att arbeta med PRBS-signalen (störsignal) på tillförd eleffekt än på primärflödet. Någon nämnvärd skillnad i resultat (tidskonstant) beroende på mätprincip har inte kunnat konstateras

* Mätningarna visar på skillnader i dynamiskt beteende för rörvärmeväxlaren och den lödda plattvärmeväxlaren. Beräknade värden för rörvärmeväxlaren har bekräftats vid mätningarna.

* Mätprincipen, baserad på brusanalys, kan troligen mycket väl användas även vid andra mer generella dynamiska studier. Metoden är dock linjär vilket innebär att resultaten i en viss driftsituation fö en olinjär process inte generellt kan tillämpas fö alla tänkbara fall utan gäller i begränsat arbetsområde.

10 Erkännanden

För värdefulla synpunkter under projektets genomförande riktas ett tack till

Åke Berg, Stockholm Energi
Göte Ekström, VVF
Peter Gummérus, CTH
Åke Narfgren, LTH
Bengt-Åke Selander, Lindesbergs Energiverk

Ett tack riktas också till Zander & Ingeström som ställt upp med den lödda plattvärmeväxlaren.

Referenser

1. Walletun, H. och Oddving, B. (1986): Provning av värmeväxlare för radiatorer och tappvarmvatten. Studsvik Arbetsrapport ED-86/34.

2. Ekström, G. m fl (1987): Produktprovning - Värmeväxlare, delrapport 1. Svenska Värmeverksföreningen.

3. Bergdahl, B. G. m fl (1986): Noise applications at Studsvik. Studsvik Arbetsrapport NI2 ACL.

4. Bergdahl, B. G. och Walletun, H. (1989): Dynamisk provning av värmeväxlare med hjälp av processidentifiering. Studsvik Arbetsrapport NI-89/3.

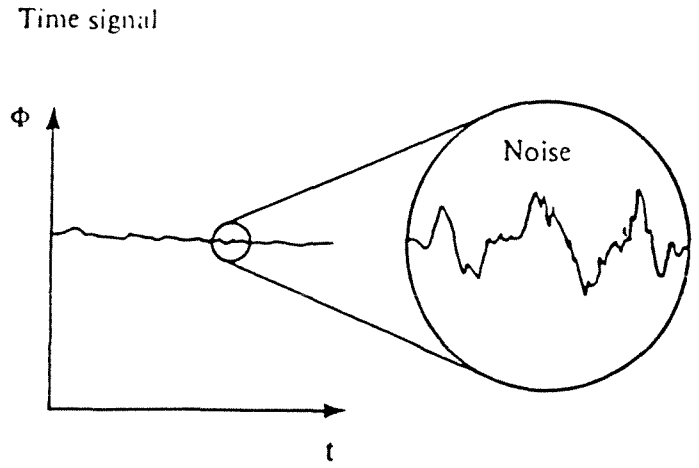
5. Hewlett-Packard Journal. (September 1967)

6. Tan, K. S. och Spinner, I. H. (1978): Dynamics of a shell-and-tube heat exchanger with finite tube-wall heat capacity and finite shell-side resistance. Ind. Eng. Chem. Fundam., vol 17, no. 4, 1978.

7. Shah, R. K. (1981): The transient response of heat exchangers. Heat exchangers - Thermal-Hydraulic fundamentals and design, 1981.

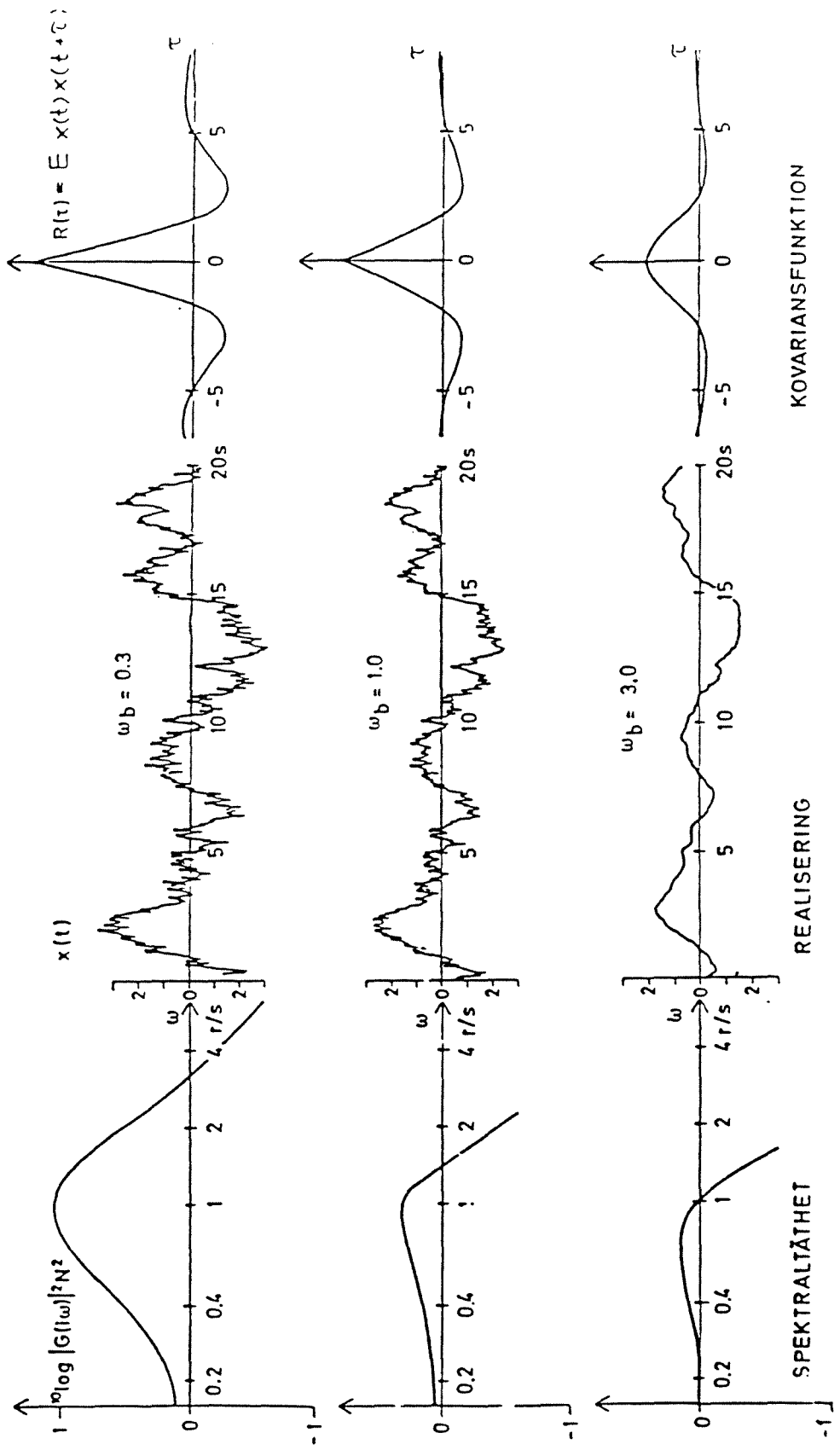
ALLMÄNT OM PROCESSIDENTIFIERING

Så snart som man registrerar en givarsignal finner man det förhållande som visas i figur 2. En likspänning som svarar mot den fysikaliska storheten och överlagrat denna en brussignal. Brussignalen har olika ursprung men oftast innehåller den intressant information om processens dynamik.



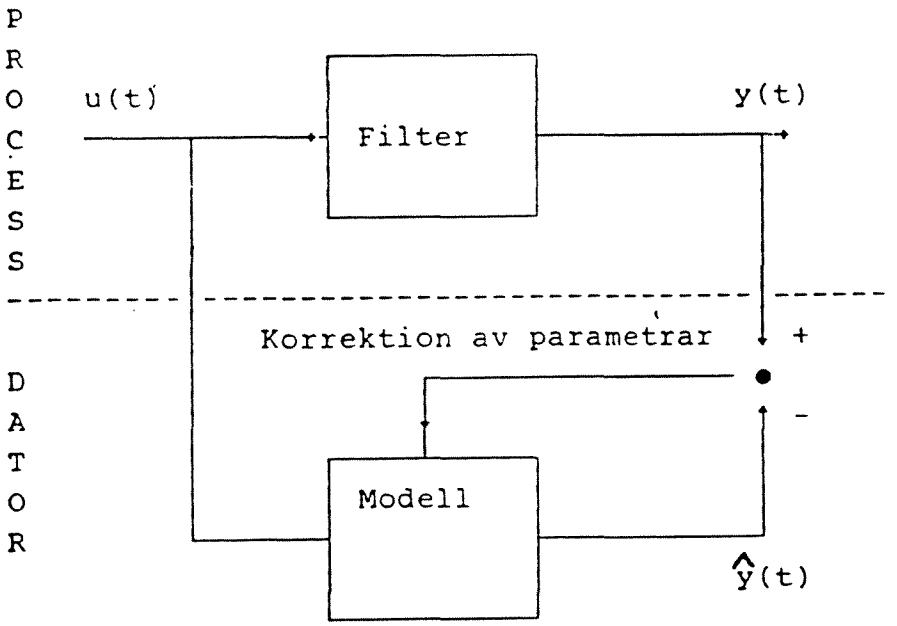
Figur 2 Givarsignal med överlagrat brus.

Bruset är en stokastisk process som rent språkligt betyder kaos. En brussignal blir ständigt ny allt efter som tiden går. Som väl är finns det egenskaper hos brussignalen som är stabila, dit hör korrelationsfunktionen, amplitudfördelningen, signalens medelvärde samt variansen. Signalernas spektrum erhålls genom fouriertransformering av autokorrelationsfunktionen. Detta innebär att spektrum och korrelationsfunktionen är två sätt att åskådliggöra en och samma information. Man brukar säga att funktionerna är varandras avbilder i frekvens- och tidsplanet, se figur 3. Den översta av bruskurvorna i figur 3 innehåller snabba förändringar i jämförelse med den understa kurvan.Detta förhållande kan också avläsas i signalernas spektrum. Den övre kurvan har högst gränsfrekvens. Brusteknik och processidentifiering är matematisk manipulation av korrelationsfunktioner och spektrum. Ibland använder man sig av de kända matematiska samband som gäller för en process för att tillsammans med brusinformation skatta processens parametrar.



Figur 3 Brussignaler med tillhörande korrelationsfunktioner och spektrum. Ur referens 1.

Identifiering av process parametrar kan ske även om inget matematiskt underlag för processen är tillgängligt. Av figur 4 framgår ideen. Processen uppfattas som en black box med insignalen u(t) och utsignalen y(t). Signalerna samplas av en dator och en allmän modellstruktur finns programmerad. Ett exempel på en sådan modell är Kalman-filter. Modellens utsignal $\hat{y}(t)$ jämförs med processens utsignal. Om differensen är noll är modellen och processen i överensstämmelse. En avvikelse leder automatiskt till korrektion av modellen. Den på detta sätt erhållna modellen kan sedan nyttjas för bestämning av processens dynamik. Stegsvar kan genomföras och på så vis kan tidskonstanter och stabilitets-marginaler beräknas. Allt detta sker utan att störa processen.



Figur 4 Processidentifiering.

Den modell som används i detta arbete är Auto Regressive (AR) med en insignal u(t) och en utsignal y(t).

$$y(t) = \sum_{m=1}^{M} A(m)\, y(t-m) + \sum_{n=1}^{N} B(n)\, u(t-n) + e(t)$$

där y(t) = utsignal
u(t) = insignal
A(m), B(n) = filterparametrar
e(t) = vitt brus

Modellen är en del i den programvara för processidentifiering som finns tillgänglig i Studsviks mobildator.

Så snart som koefficienterna A(m) och B(n) är kända kan stegsvarstest genomföras med modellen.

Värmeforsk är ett organ för industrisamverkan inom värmeteknisk Forskning och utveckling. Stiftelsens forskningsprogram är tillämpningsinriktat och fokuseras på energi- och processindustriernas behov och problem. Bakom Värmeforsk står följande huvudmän:

- Elforsk
- Värmeverksföreningen
- Övrig industri

Värmeforsk samarbetar med Närings- och teknikutvecklingsverket (NUTEK).

STIFTELSEN FÖR VÄRMETEKNISK FORSKNING

Box 1765 · 111 87 Stockholm
Tek: 08-7900600 · Fax 08-796 00 37