

ISSN 0280-5316  
ISRN LUTFD2/TFRT--5525--SE

Modellering av processer i  
reglersystemen för effekt,  
tryck och matarvatten i  
kokarvattenreaktorer

Martin Nyquist  
Magnus Scherman

Institutionen för Reglerteknik  
Lunds Tekniska Högskola  
Januari 1995

<b>Department of Automatic Control</b> <b>Lund Institute of Technology</b> P.O. Box 118 S-221 00 Lund Sweden		<i>Document name</i> MASTER THESIS	
		<i>Date of issue</i> January 1995	
		<i>Document Number</i> ISRN LUTFD2/TFRT--5525--SE	
<i>Author(s)</i> Martin Nyquist and Magnus Scherman		<i>Supervisor</i>	
		<i>Sponsoring organisation</i>	
<i>Title and subtitle</i> Modellering av processer i reglersystemen för effekt, tryck och matarvatten i kokarvattenreaktorer. (Modeling of Processes in the Control Systems for Reactorpressure, Power and Feedwater in Boiling Water Reactors.			
<i>Abstract</i> <p>This report is meant as support when modeling the processes in the control systems for power, pressure and reactorlevel in a Boiling Water Reactor. The presented models are in general form and have to be combined with specific plant characteristics.</p> <p>Different MATLAB-tools for system identification and validation are used and described. The report also deals with methods of using the simulation program BISON to collect data for process identification.</p> <p>The steamline model for Barsebäck 2 is identified using data from BISON. Process data from Ringhals 1 is used to identify the hydraulic link of the feedwater pump.</p> <p>All models have been implemented in MATLAB/SIMULINK.</p>			
<i>Key words</i>			
<i>Classification system and/or index terms (if any)</i>			
<i>Supplementary bibliographical information</i>			
<i>ISSN and key title</i> 0280-5316			<i>ISBN</i>
<i>Language</i> Swedish	<i>Number of pages</i> 76	<i>Recipient's notes</i>	
<i>Security classification</i>			

Distribution SCB Mårten Åkesson LTH Rolf Johansson	Från - From SCB	Datum - Date 94-12-13	Reg.	Sida - Page 1 (75)
	Författare - Author(s) Martin Nyquist, Magnus Scherman			
	Granskad - Examined SCB Åkesson <i>[Signature]</i>		Godkänd - Approved SCB Rydahl <i>[Signature]</i>	
	Titel/Title  <b>Modelleringshandbok</b>			

Sammanfattning - Abstract

Rapporten är avsedd som stöd vid framtagning av processmodeller till reglersystemen för effekt, tryck och reaktornivå i en kokarvattenreaktor. Modellerna är av allmän karaktär och behöver kompletteras med anläggningsdata för aktuellt verk.

I ett teorikapitel behandlas de MATLAB-hjälpmiddel som finns för processidentifiering och validering. Rapporten beskriver dessutom hur simuleringsprogrammet BISON kan utnyttjas för identifiering.

Modellerna har realiserats i MATLAB/SIMULINK.

Rev nr	Datum - Date	Reviderad - Revised	Granskad - Examined	Godkänd - Approved
--------	--------------	---------------------	---------------------	--------------------

Kopia:

SCB E Gustavsson, Zettergren, Ringdahl, Carrera, Roustaei, SCA  
Ericsson, Ring, NTD Svensson, Jaliff  
SC, SCA, SCB, SCC, övriga SCB, NT, NTD

Kopia 1:a sidan:

Den här handling får ej utan vårt medgivande kopieras. Den får ej heller delgivas annan eller eljest obehörigen användas. Överträdelse härav beivras med stöd av gällande lag. ABB Atom

This document must not be copied without our written permission, and the contents thereof must not be imparted to a third party nor be used for any unauthorized purpose. Contravention will be prosecuted. ABB Atom



## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	INLEDNING	4
1.1	Syfte	4
1.2	Arbetsgång	4
1.3	Kort beskrivning av kokarvattenreaktorn	5
1.3.1	Effektreglering	5
1.3.2	Tryckreglering	6
1.3.3	Nivåreglering	6
1.4	Handlingsplan	7
2	DELMODELLER	9
2.1	Effekt	9
2.1.1	Extern HC-pump	11
2.1.2	Intern HC-pump	16
2.1.3	Härd	17
2.2	Tryck	19
2.2.1	Reaktor	19
2.2.2	Ångledning	21
2.2.3	Turbin	24
2.3	Matarvattensystemet	26
2.3.1	Verk utan matarvattentank	27
2.3.1.1	Kondensor	27
2.3.1.2	Kondensatpump	28
2.3.1.3	Matarvattenpump	29
2.3.1.4	Kompressibel volym	34
2.3.1.5	Ventiler	35
2.3.1.6	Reaktortanken	37
2.3.2	Verk med matarvattentank (F3, O3)	38
2.3.2.1	Matarvattentank	38
2.3.2.2	Booster- och matarvattenpumppaket	38
3	REALISERING I MATLAB	39
4	IDENTIFIERING	40
4.1	Linjär processidentifiering med Identification Toolbox	40
4.2	Validering	45
4.3	Val av insignal	48
5	BISON	51
5.1	När lämpar sig bison För identifiering?	51
5.2	Bison-simulering	52
5.2.1	Kommunikation med UNIX	52
5.2.2	Start av simulering	52
5.2.3	Dataformat	53
5.2.4	Framtida förbättringar av BISON	53
5.2.5	Specificering av BISON-körning	54

6	EXEMPEL PÅ IDENTIFIERING	56
6.1	Identifiering ställdonsläge till varvtal för matarvattenpump	56
6.1.1	Identifiering med ofiltrerade signaler	60
6.1.2	Identifiering med filtrerade signaler	63
6.2	Identifiering av ångledningsmodellen med bison-mätdata	66
7	RESULTAT OCH FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE	71
8	SLUTORD	72
9	REFERENSER	73
	REVISIONSFÖRTECKNING	75
	BILAGOR	
	1 Masströghet i ledningar	
	2 PRBS	
	3 O2-steamflow.input	
	4 AWK	
	5 Signalspecifikation BISON	
	6 Identifieringsprogram	
	7 MATLAB-realiseringar	

## 1 INLEDNING

### 1.1 SYFTE

För att minska felrisken vid driftsättning av levererade regulatorer trimmas reglerparametrarna innan leverans mot en on-line simulator.

Syftet med examensarbetet är att skriva en handbok för modellering. Denna ska fungera som stöd vid framtagning av modeller för realtidssimulering av effekt-, tryck- och nivå-reglersystemen.

Handboken ska steg för steg beskriva arbetsgången och belysa de olika problem man kan stöta på hela vägen från framtagning av delmodeller till validering och sammankoppling av de färdiga systemen.

Målsättningen är att handboken kompletterad med data från aktuellt verk ska kunna utgöra grunden för en effektiv och riktig framtagning av simuleringsmodeller.

### 1.2 ARBETSGÅNG

Vårt arbete har i tur och ordning bestått av följande moment.

#### 1. Framtagning av delmodeller.

För samtliga processer som är av betydelse vid simulering av de olika systemen har modeller framtagits. Detta arbete har till stor del bestått av arkivsökning.

#### 2. Realisering i MATLAB/SIMULINK.

Samtliga modeller har implementerats i SIMULINK, dels var för sig och dels sammankopplade till kompletta system.

#### 3. Programmering av MATLAB-makro.

Ett makro har skrivits för att effektivisera användningen av Identification Toolbox i MATLAB.

#### 4. Instruktioner för framtagning av mätdata från BISON.

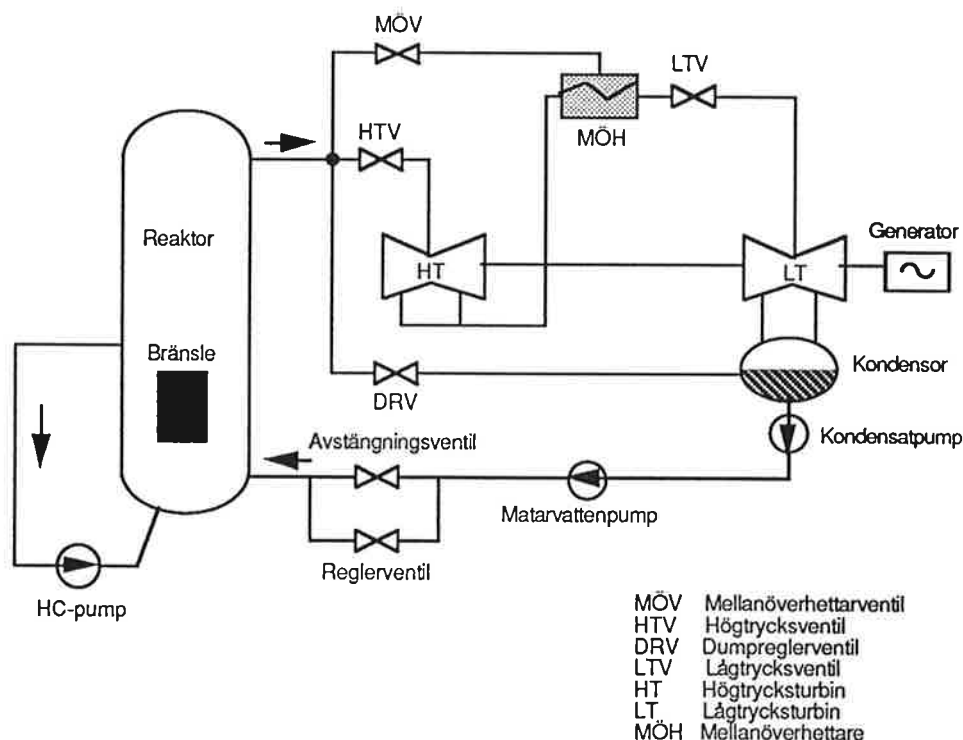
Riktlinjer har tagits fram för när och hur det är lämpligt att använda simuleringsprogrammet BISON för att få fram mätdata för identifiering av våra modeller.

#### 5. Identifieringsexempel.

Två identifieringar har utförts som exempel, en med verkliga mätdata och en med mätdata från BISON.

## 1.3 KORT BESKRIVNING AV KOKARVATTENREAKTORN

I detta avsnitt beskrivs kortfattat de delar av kokarvattenreaktorn (Boiling Water Reactor) som är av störst betydelse för denna rapport. En naturlig uppdelning får man om man betraktar de tre reglersystem som modelleras i kapitel 2. Dessa är regleringen av effekt, tryck och nivå.



Figur 1.1. Förenklad skiss av kokarvattenreaktor.

## 1.3.1 Effektregering

I reaktortanken finns kärnbränslet omgett av vatten. Värmeutvecklingen i bränslet bromsas genom att styrostavarna absorberar neutroner. Styrostavarna skjuts in och ut mellan bränslepatronerna.

Neutronerna modereras av vattnet kring bränslet. Genom att med huvudcirkulationspumpar (HC-pumpar) cirkulera vattnet hålls bränsletemperaturen på en låg och konstant nivå. En sänkt vattentemperatur minskar ånghalten i vattnet. Detta leder till att neutronerna modereras bättre vilket ökar effekten. Ökad effekt ger mera kokning och sämre moderering och därmed effektminskning, dvs negativ återkoppling.

Effekten är även beroende av trycket i reaktortanken. Ökat tryck leder till minskad ånghalt i vattnet och därmed även ökat neutronflöde. Återkopplingen från reaktortryck till effekt kallas reaktivitetsåterkoppling (void). På grund av denna återkoppling är det väsentligt att trycket hålls konstant av tryckregulatorn.

Effekten regleras vid normal drift genom att vid konstant styrstavsläge reglera HC-pumparnas varvtal. HC-pumparna är antingen integrerade i reaktortanken (interna) eller förbundna med reaktortanken via rör (externa).

### 1.3.2 Tryckreglering

Tryckreglersystemet har till uppgift att reglera trycket i reaktorn. Normalt reaktortryck är 70 bar. Producerad ånga leds bort från reaktorn via ångledningsrör. Ånguttaget, och därmed även trycket i reaktorn, regleras vid normal drift med högtrycksventilerna (HTV). Ångan som passerar dessa ventiler leds vidare till turbinerna.

Cirka 10% av ångflödet leds istället via mellanöverhettarventilerna (MÖV) till mellanöverhettaren. Denna har till uppgift att värma upp den ånga som passerat högtrycksturbinen (HT) innan den når lågtrycksturbinen (LT).

Vid tillfällen då turbinerna inte klarar av att ta emot all ånga öppnas dumpreglerventilerna (DRV) och ångan leds direkt till kondensorn. Alla DRV är stängda vid normal drift. Till kondensorn leds även ångan som passerat turbinerna.

### 1.3.3 Nivåreglering

Från kondensorn leds vattnet via matarvattenledningen tillbaka till reaktortanken. Trycksättning sker med kondensatpumpar och matarvattenpumpar. På sin väg tillbaka till reaktortanken passerar vattnet dessutom två parallella ventiler, reglerventilen (mavaventilen) och avstängningsventilen (bypassventilen). Vid normal drift regleras vattennivån i reaktortanken med mavapumparnas varvtal. Vid låga flöden blir det dynamiska tryckfallet i matarvattenledningen för litet varför avstängningsventilen stängs och man reglerar då även med reglerventilen. Kondensatpumparna drivs med konstant varvtal.



## 1.4 HANDLINGSPLAN

För att strukturera upp arbetet ges här ett förslag till handlingsplan där hänvisning sker till handbokens olika kapitel.

## 1. Samla information om aktuellt verk.

Eftersom olika verk skiljer sig åt i flera avseenden krävs det att man först sätter sig in i det aktuella verkets uppbyggnad. I kapitel 2 påpekas efterhand en del av de skillnader som kan uppträda. Lämpliga källor är FSAR, DOKARK\_94, DOKARK\_93 och DOKARK\_00\_92.

## 2. Val av delmodeller.

Utifrån kunskap inhämtad under punkt 1 väljs de delmodeller som är aktuella ur kapitel 2. Delmodellerna bör granskas ordentligt för att se att de verkligen passar in i det aktuella sammanhanget.

Modellerna har realiserats i MATLAB/SIMULINK och finns sparade i SC-Arkiv/Gemensamt SC/Modelleringshandbok. De återfinns där i mappen Modeller.

## 3. Komplettering av delmodeller.

Utvalda delmodeller behöver kompletteras med bl a pumpkurvor, ventilkarakteristik och parametrar. Ställning måste tas till vilka parametrar som ska räknas fram och vilka som ska identifieras genom processidentifiering. I de fall parametrarna ska räknas fram krävs anläggningsspecifika data. Dessa data kan för vissa verk hämtas från de anläggningsdatabaser som utvecklats på NTD, se exempelvis NTD 93-144. Av kapitel 2 framgår vilka parametrar som kan räknas fram, och hur man räknar fram dem.

## 4. Processmätning.

De parametrar som inte kan räknas fram eller på annat sätt är kända måste bestämmas med processidentifiering. Mätdata hämtas antingen från den verkliga processen eller från simuleringprogrammet BISON. I kapitel 5 behandlas frågan om när BISON-mätdata lämpar sig för processidentifiering och hur en BISON-körning utförs. Här ges även riktlinjer för val av samplingstid, mättid mm. Valet av insignal behandlas i avsnitt 4.3.

## 5. Processidentifiering.

När lämpliga processmätdata införskaffats kan identifieringsarbetet påbörjas. De MATLAB-verktyg som finns för identifiering beskrivs teoretiskt i kapitel 4 och två identifieringsexempel återfinns i kapitel 6.

## 6. Sammankoppling av delmodeller.

Till sist sammankopplas de kompletterade delmodellerna till totala system för reglering av effekt, tryck eller nivå. Här är det återigen viktigt att hänsyn tas till det aktuella verkets uppbyggnad. De sammankopplade modeller vi presenterar i mappen Modeller bör främst ses som exempel på hur de olika signalerna hänger ihop.

## 2 DELMODELLER

Under denna rubrik presenteras de delmodeller som sedan kopplas samman till kompletta system för simulering av effekt-, tryck- och nivåreglersystem.

### Skalning

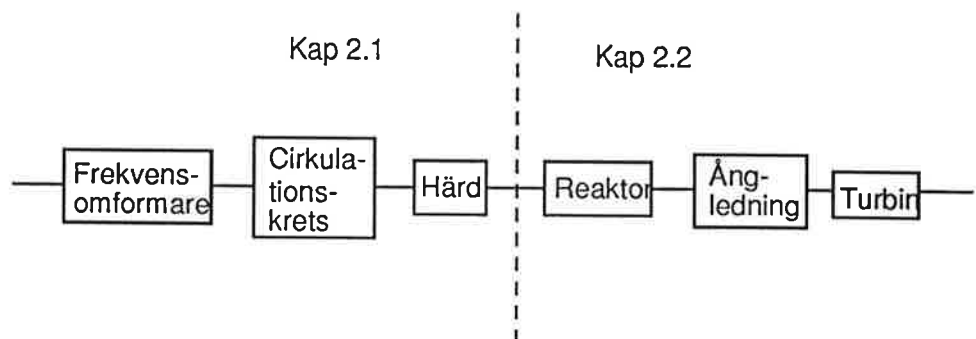
Det är viktigt att vara konsekvent vid val av enheter för att de olika bitarna ska passa ihop. Vi anger aktuella enheter i samtliga modeller nedan. Normalt väljer man ett nominellt värde för varje storhet. Alla signaler anges sedan i procent av detta nominella värde. Detta leder till att samtliga konstanter blir dimensionslösa och av hanterlig storleksordning. Vi använder oss inte av några nominella värden eftersom dessa varierar mellan verken.

### 2.1 EFFEKT

Effektreglersystemet (system 534/535) har vid normal drift till uppgift att reglera reaktorns effekt genom att via frekvensomformare styra HC-pumparnas varvtal.

I detta avsnitt återfinns modeller för härden samt två olika typer av huvudcirkulationspumpar. Modellerna för HC-pumparna byggs upp av frekvensomformare och cirkulationskrets.

Eftersom stationens eleffekt regleras består det kompletta effektreglersystemet dessutom av modeller för reaktor, ångledning och turbin. Dessa delmodeller ingår även i tryckreglersystemet och återfinns därför i avsnitt 2.2.



**Figur 2.1.** Effektmodellen.

Det finns i princip två olika varianter av frekvensomformare. I Oskarshamn 1 och 2 (O1/2), Barsebäck (B1/2) och Ringhals 1 (R1) är frekvensomformarna av roterande typ och består bla av en hydraulkoppling. Den nyare, statiska, typen återfinns i Forsmark 1-3 (F1/2/3), TVOI/II och O3 och är baserad på halvledarteknik.

Förutom frekvensomformarna skiljer sig de två reaktorgenerationerna åt i placeringen av HC-pumparna. F1/2/3, TVOI/II och O3 har interna HC-pumpar, dvs integrerade i reaktortanken. Externa HC-pumpar står däremot i förbindelse med reaktorn via yttre kretsar, i vilka det också finns ventiler.

### Effektregulatorer

De signaler man i första hand är intresserad av i samband med effektreglering är stationens eleffekt (alternativt termisk effekt), neutronflöde och HC-pumpvarvtal.

Effektregulatorerna skiljer sig något åt från verk till verk. Generellt sett har man ett antal olika driftformer att välja mellan. Dessa kan vara t ex effektreglering, neutronflödesreglering, varvtalsreglering av HC-pumparna och frekvenskompensering. Normalt används driftformen effektreglering.

I exempelvis Forsmark 1,2 och 3 regleras den elektriska effekten genom att generatoreffekten jämförs med ett börvärde i den överordnade effektregulatorn. Utifrån detta beräknas ett neutronflödesbörvärde till neutronflödesregulatorn, där det jämförs med ärvärdet av neutronflödet, varefter ett varvtalsbörvärde ges till var och en av HC-pumparnas varvtalsregulatorer. Reglerparametrarna i neutronflödesregulatorn fås från en adapteringskrets och varierar med neutronflödet och HC-flödet. Anledningen till detta är att man vill anpassa reglerparametrarna till olinjäriteten i processen.

Ett alternativ till reglering av elektrisk effekt är att reglera den termiska effekten. Vid reglering av den termiska effekten beräknas denna först i effektregulatorn genom att ställa upp den termiska effektbalansen för reaktortanken. Den termiska effekten fås ur ångeffekt, matarvatteneffekt, effekt på grund av HC-pumparnas flöde och förlusteffekter. Kalibrering sker dessutom för att få överensstämmelse med stationens andra beräknade termiska effekt.

Neutronflödesreglering innebär att man kopplar förbi den överordnade effektregulatorn och ger ett neutronflödesbörvärde direkt till neutronflödesregulatorn. På motsvarande sätt ges ett varvtalsbörvärde direkt till varvtalsregulatorn vid varvtalsreglering av HC-pumparna. Frekvenskompensering används i regel ej men innebär att man korrigerar stations-effekten för att bidra till att upprätthålla konstant nätfrekvens.

### 2.1.1 Extern HC-pump

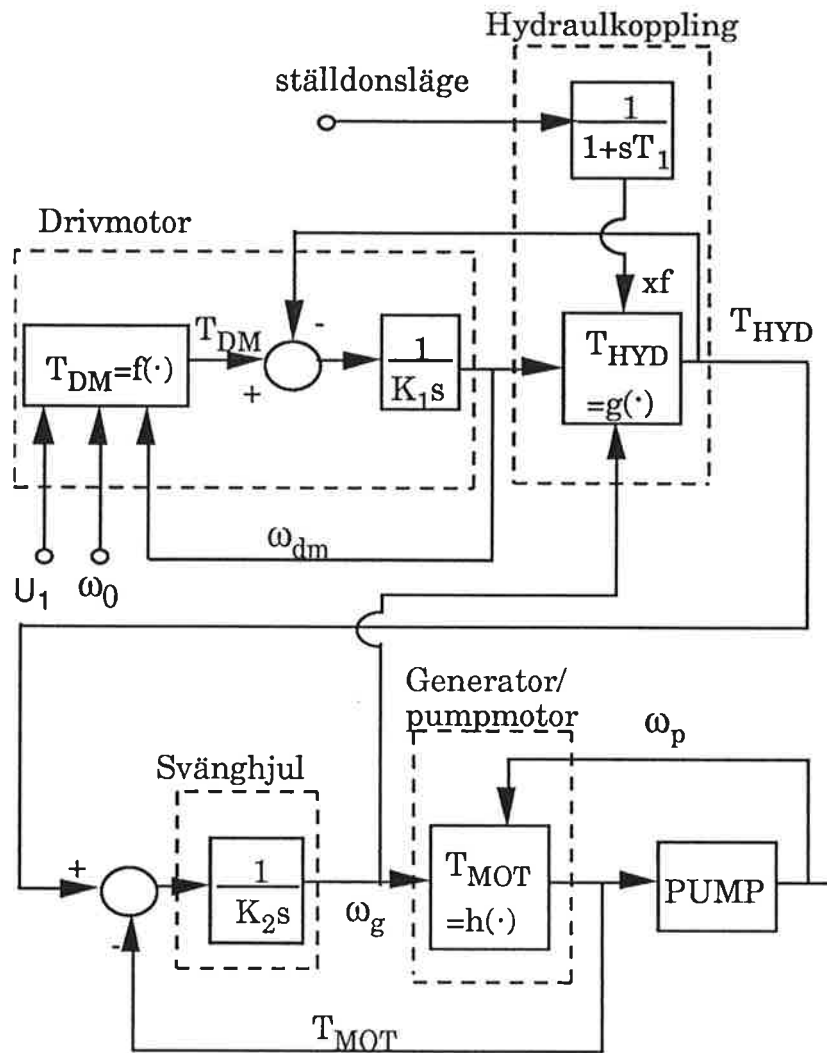
#### Roterande frekvensomformare

HC-pumpmotorn är en asynkronmotor som matas med varierande spänning och frekvens från en separat frekvensomformare. Frekvensomformaren består av en drivmotor som via en hydraulkoppling och ett svänghjul driver en synkron-generator. Matningsfrekvensen till pumpmotorn kommer därmed att variera med varvtalet hos generatoren, vilket i sin tur bestäms av det överförda momentet i hydraulkopplingen. Detta moment beror av ingående varvtal, utgående varvtal och fyllnadsgraden i hydraulkopplingen. Sambandet ges av momentkurvan för hydraulkopplingen.

Normalt har drivmotorn konstant varvtal och regleringen sker genom att reglera ett ställdonsläge, som bestämmer fyllnadsgraden.

Figur 2.2 visar en BISON-modell för Oskarshamn 2 hämtad från [1]. Eftersom denna modell är framtagen för att simulera t ex nätbortfall kan man göra vissa förenklingar. Exempelvis kan  $U_1$  och  $\omega_0$  anges som konstanter. Givetvis är det enklast att hämta konstanterna direkt från BISON-modellen, istället för att utföra processidentifiering på BISON-mätdata.

Modellen för ställdonet finns i nästa avsnitt. Övergången från ställdonsläge till hydraulkopplingens fyllnadsgrad modelleras som en enkel tidskonstant.



Figur 2.2. Modell för roterande frekvensomformare.

$$f(\cdot) = K_3 \frac{U_1^2}{\omega_0^2} \frac{\omega_0 - \omega_{dm}}{(\omega_0 - \omega_{dm})^2 + K_4}$$

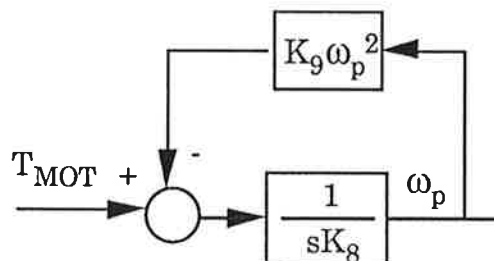
$$g(\cdot) = g(\omega_g, \omega_{dm}, xf)$$

$$h(\cdot) = K_5 K_7^2 \frac{\omega_g - \omega_p}{(\omega_g - \omega_p)^2 + K_6}$$

$U_1$	Spänning drivmotor	[V]
$\omega_0$	Vinkelfrekvens drivmotor (in)	[rad/s]
$\omega_{dm}$	Vinkelfrekvens drivmotor (ut)	[rad/s]
$\omega_g$	Vinkelfrekvens generator	[rad/s]
$\omega_p$	Vinkelfrekvens pump	[rad/s]
$T_{DM}$	Moment drivmotor	[Nm]
$T_{HYD}$	Moment hydraulkoppling	[Nm]
$T_{MOT}$	Moment HC-pumpmotor	[Nm]
$K_1$	Tröghetsmoment för drivmotor	[kgm <sup>2</sup> ]
$K_2$	Tröghetsmoment för svänghjul och pumpmotor	[kgm <sup>2</sup> ]
$K_3$	Modellkoefficient drivmotor	
$K_4$	Modellkoefficient drivmotor	
$K_5$	Modellkoefficient pumpmotor	
$K_6$	Modellkoefficient pumpmotor	
$K_7$	Kvot mellan spänning och $\omega_g$ för pumpmotor	[V/(rad/s)]
$T_1$	Tidskonstant fyllnadsgrad	[s]

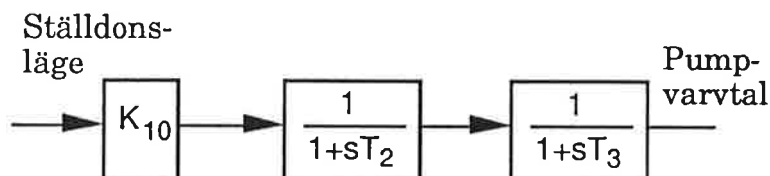
**Tabell 2.1.** Förklaring av beteckningar i figur 2.2.

Blocket "PUMP" i figuren utgörs i modellen av en subrutin som kan vara alltför komplicerad för dessa ändamål. Vi hämtar istället denna del från [2], där Oskarshamn 1 modelleras. Pumpens belastande moment anges som proportionellt mot varvtalet i kvadrat och mha momentbalans integreras vinkelfrekvensen fram, se figur 2.3. Vinkelfrekvensen normeras sedan till varvtal.



**Figur 2.3.** Moment till varvtal.

En enklare modell för sambandet mellan ställdonsläge och varvtal återfinns i [3]. Rapporten innehåller modeller för Oskarshamn 1, och här förenklas frekvensomformaren till två tidskonstanter och en förstärkning. Denna modell är dessutom mer lämpad för processidentifiering på verkliga processmätdata.



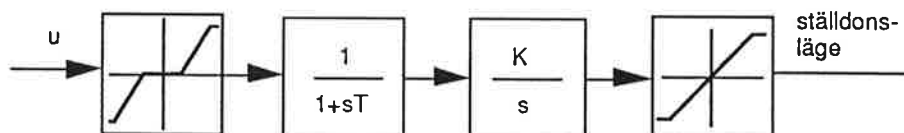
**Figur 2.4.** Enkel modell för roterande frekvensomformare.

$$G(s) = \frac{K_{10}}{1 + sT_2} \frac{1}{1 + sT_3}$$

Insignal är ställdonsläget (%) och utsignal HC-pumpens varvtal (rpm). Modellen är mycket enkel och kan i kombination med linjärisering kring arbetspunkter vara ett fullgott alternativ.

### Ställdon

Insignalen till ställdonet är en spänning till ställdonsmotorn. Denna resulterar i en vinkelhastighet som om den integreras ger ställdonsläget. Modellen av ställdonet omfattar även ett dödband, en tidskonstant och en begränsning av utsignalen. I regel regleras läget med en regulator som återkopplar såväl läget som en tachosignal.

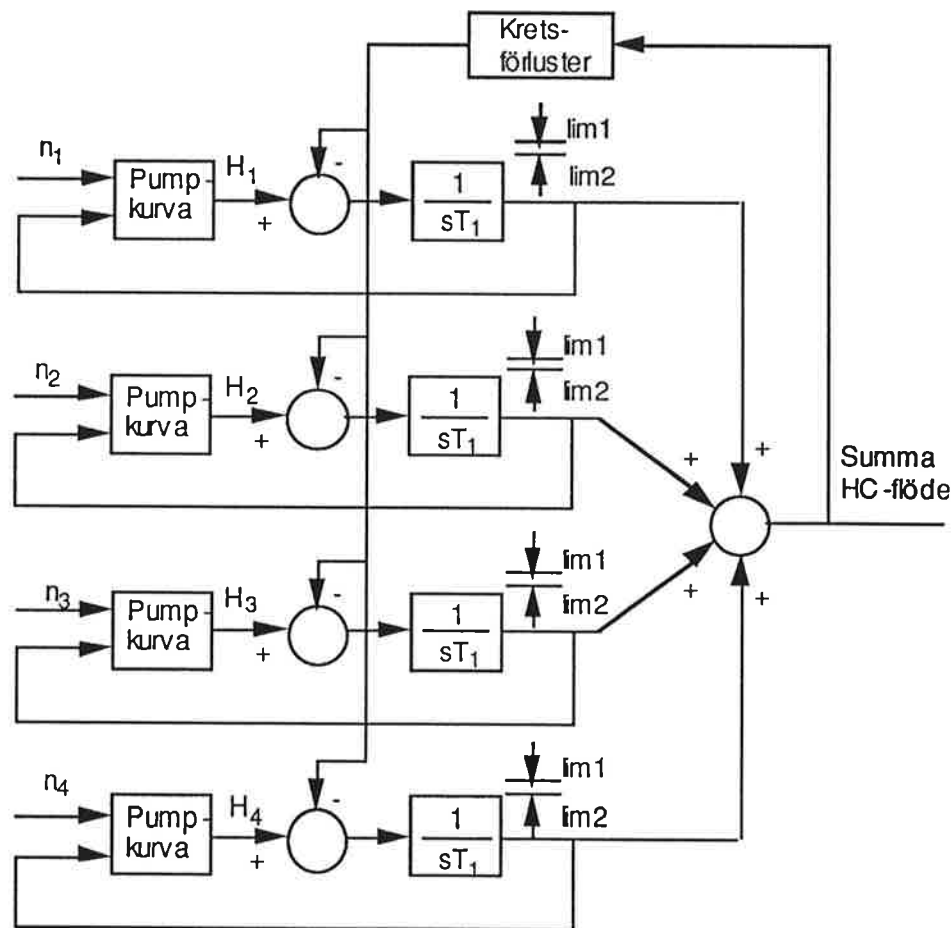


**Figur 2.5.** Ställdon.



**Cirkulationkrets**

Pumpflödet som funktion av varvtalet integreras fram ur pumptryckuppsättningen och krets-förluster för varje enskild pump. Förlusterna kan modelleras som beroende av flödet i kvadrat. Totala flödet fås genom summering. Figuren är uppritad för fallet med fyra HC-pumpar. Denna modell är hämtad från [2], processmodell för system 535 i O1.



**Figur 2.6.** Cirkulationskrets.

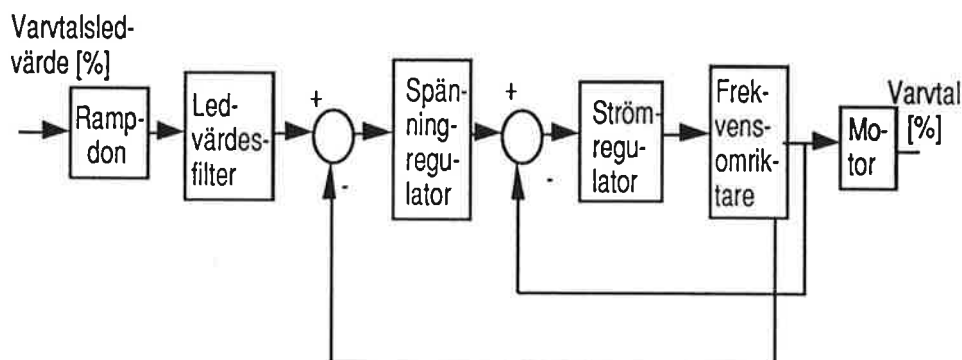
$n_i$	Varvtal HC-pump nr i	[rpm]
$H_i$	Uppfordringshöjd HC-pump nr i	[bar]
$T_1$	Integrationskonstant	[1/m]
lim 1	Övre begränsning	[kg/s]
lim 2	Undre begränsning	[kg/s]

**Tabell 2.2.** Förklaring av beteckningar i figur 2.6.

## 2.1.2 Intern HC-pump

### Statisk frekvensomformare

Med denna konstruktion ges ett varvtalsledvärde till frekvensomformaren. För att begränsa signalen vid upp- och nedstyrning används en osymmetrisk ramp. Signalen filtreras därefter i ett ledvärdesfilter. Frekvensomformaren innehåller även en strömregulator, en spänningsregulator och en frekvensomriktare med likriktare, två växelriktare och en transformator.

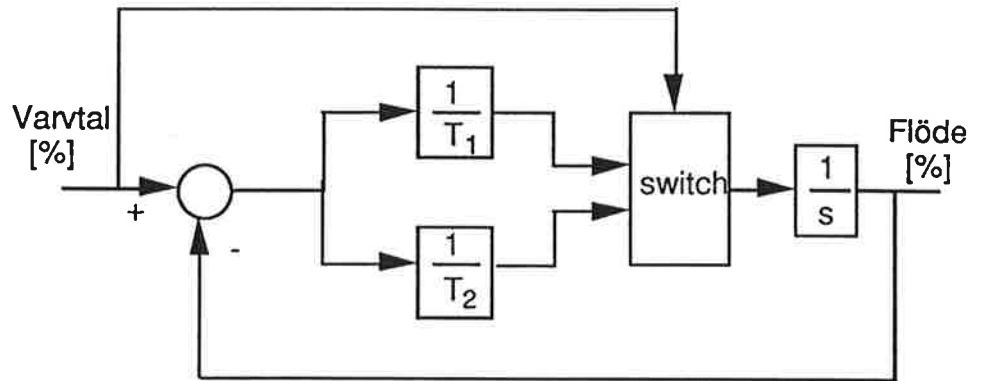


**Figur 2.7.** Statisk frekvensomformare (av typ YRQA och YRQF).

I processmodellerna för F3 och O3 [4] tas endast hänsyn till rampdonet och filtret vid modelleringen från varvtalsledvärde till varvtal. Anledningen är att modellen ej behöver simulera nätbortfall, och under normala omständigheter är regleringen av spänning och ström tillräckligt snabb för att dynamiken i denna del skall kunna försummas i förhållande till rampdon och filter. Även dynamiken i motorn försummas. Parameterinställningen för filter och rampdon varierar från anläggning till anläggning och finns att tillgå. Processidentifiering är därför ej nödvändig.

### Cirkulationskrets

I cirkulationkretsmodellen för externa HC-pumpar utnyttjas uppfodringshöjden, som beror av varvtalet i kvadrat vid konstant flöde. De interna HC-pumparna kan dock approximeras med ett första ordningens filter inom det normala driftområdet. Dessutom införs olika tidskonstanter för flödesökning respektive flödesminskning. Modellen är hämtad från [4].



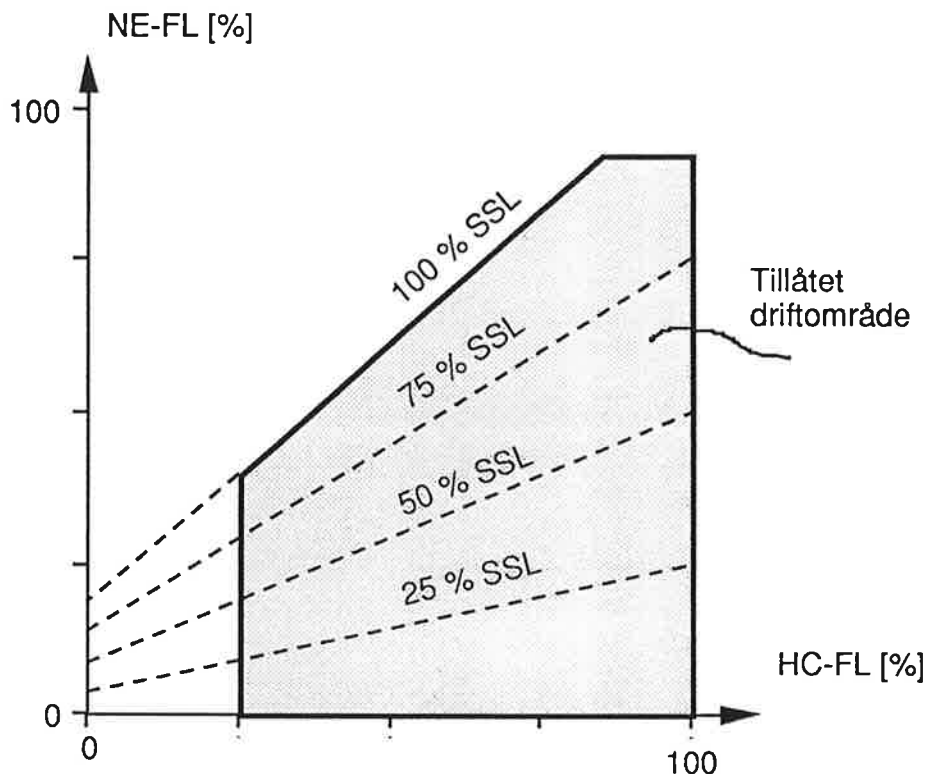
**Figur 2.8.** Cirkulationkrets.

$$G(s) = \frac{1}{1 + sT_1} \quad \text{flödesökning}$$

$$G(s) = \frac{1}{1 + sT_2} \quad \text{flödesminskning}$$

### 2.1.3 Härd

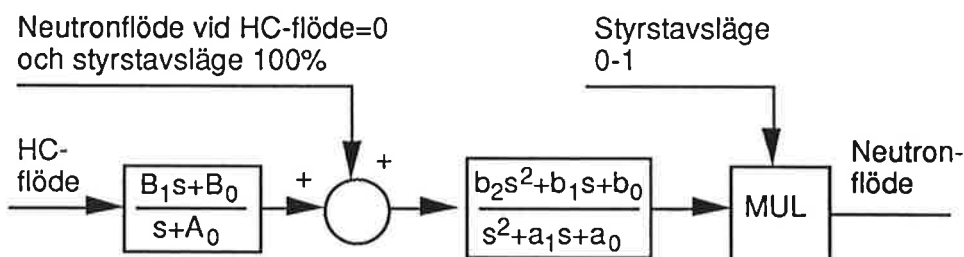
Två av de parametrar som bestämmer neutronflödet i reaktorn är styrstavsläget och HC-flödet. Dessutom inverkar bla reaktivitetsåterkopplingen som finns modellerad i avsnittet Reaktormodell (2.2.1). Denna tas därför inte upp i härdmodellen. Figur 2.9 visar en principskiss över reglerlinjerna som funktion av styrstavsläget. Bilden visar vilka möjligheter det finns att påverka neutronflödet givet ett visst styrstavsläge. Som synes är det inte tillräckligt att variera HC-flödet för att åstadkomma neutronflöden över hela intervallet, utan att ändra styrstavsläget.



**Figur 2.9.** Reglerlinjer som funktion av styrstavsläge(SSL).

Härden har en deriverande verkan, vilket innebär att modellen för neutronflödet skall innehålla derivatan av HC-flödet. Modellen innehåller också en del för härdresonans. Resonansfrekvensen ligger kring 0.3-0.6 Hz för F1/2/3 och O3.

Eftersom HC-flödet noll motsvarar ett visst neutronflöde, exempelvis 22.8% i F3 vid fullt utdragna styrstavar, är det även viktigt att ta hänsyn till denna term vid modelleringen. Med HC-flödet och neutronflödet angivna i procent blir modellen enligt [4] och [2]:



**Figur 2.10.** Härd.

## 2.2 TRYCK

Turbinregulatorn (System 461) har till huvuduppgift att via styrning av högtrycksventiler, dumpreglerventiler, lågtrycksventiler och mellanöverhettarventiler reglera reaktortrycket. Regulatorn har tre olika driftfall:

- Tryckreglering med DRV

Detta driftfall används vid tryckupp- och nedtagning. Tryckbörvärdet följer en tryckgradient och överskottsånga dumpas till kondensorn.

- Varvtals-/effektreglering

Driftfallet används vid upprullning/utrullning, fasning och pålastning/avlastning. DRV reglerar reaktortrycket med fast börvärde. Turbinens varvtal/effekt regleras med HTV och börvärdet utgörs av en varvtals-/effektgradient.

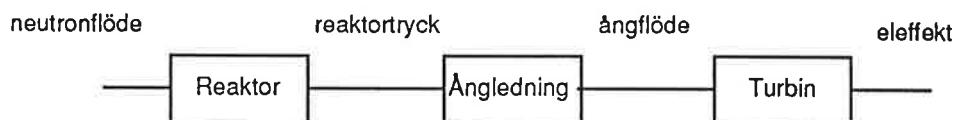
- Tryckreglering med HTV

Används vid effektdrift och kopplas automatiskt in när DRV stängs. Reaktortrycket regleras via HTV med fast börvärde.

Insignaler till turbinregulatorn är reaktortryck, neutronflöde, turbinvarvtal och generatoreffekt [5].

Reaktortrycket återkopplas till en PI-regulator. Dessutom sker en framkoppling av neutronflödet för att göra regleringen snabbare vid förändringar i reaktoreffekten.

Detta avsnitt innehåller modeller för reaktor, ångledning och turbin.

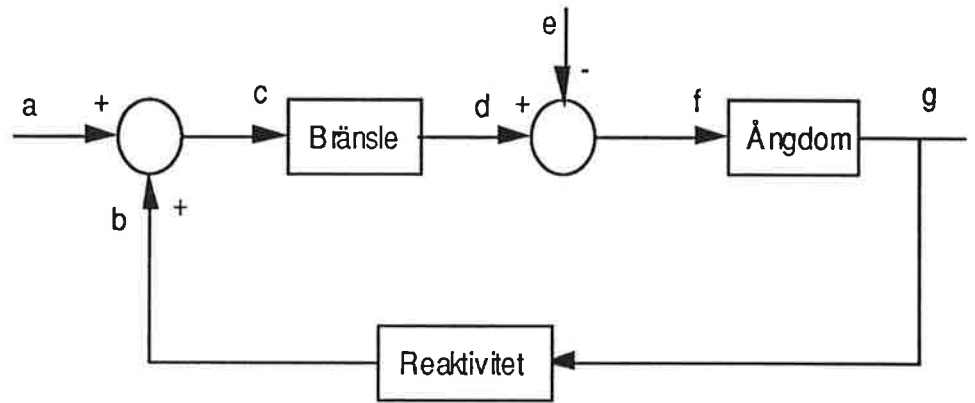


Figur 2.11. Tryckmodellen.

### 2.2.1 Reaktor

Delmodellerna i reaktormodellen baseras på processidentifiering från Oskarshamn 2 [6] [7]. Gradtalen i reaktormodellen skall ses som exempel på vad man identifierat fram för detta verk, och det är mycket möjligt att identifieringar på andra verk leder till avvikande resultat.

Modellen bygger på linjärisering kring en arbetspunkt med konstant cirkulationsflöde, styrstavsläge och reaktortryck. Signalerna i figur 2.12 är avvikelser från arbetspunkten. Se även linjärisering i avsnitt 4.1.



Figur 2.12. Reaktormodell.

a	Neutronflöde från cirkulationskretsen	[%]
b	Neutronflödestillskott på grund av reaktivitetsåterkoppling	[%]
c	a+b	[%]
d	Producerad ånga i reaktorn	[kg/s]
e	Ånguttag från reaktorn	[kg/s]
f	d-e	[kg/s]
g	Reaktortryck	[bar]

Tabell 2.3. Förklaring av beteckningar i figur 2.12.

**Bränslemodellen**

Insignalen till bränslemodellen är:

Neutronflöde (%) från cirkulationskretsen och reaktivitetsåterkopplingen.

Utsignalen är :

Producerad ånga (kg/s) i reaktorn.

$$G(s) = \frac{b_3s^3 + b_2s^2 + b_1s + b_0}{s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0}$$

**Reaktivitetsmodellen**

Insignalen till reaktivitetsmodellen är:

Reaktortryck [bar]

Utsignalen är:

Reaktivitetstillskott till bränslemodellen [%]

$$G(s) = \frac{b_3s^3 + b_2s^2 + b_1s + b_0}{s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0}$$

### Ångdom

Insignalerna till modellen är:

Från bränslemodellen producerad ånga [kg/s]

Från ångledningsmodellen uttagen ånga [kg/s]

Utsignalen är:

Reaktortryck [bar]

$$G(s) = \frac{b_0}{s}$$

## 2.2.2 Ångledning

Den modell vi presenterar här är framtagen för Oskarshamn 2. Modellen har visat bra överensstämmelse med mätningar på detta verk och är hämtad från [8]. Anledningen till att vi valde denna modell är främst att den är det färskaste alternativet.

En äldre och något annorlunda modell presenteras i [9]. Denna har verifierats med mätdata från R1.

Ytterligare en modell presenteras i [10] (modifiering av [11]). Här delas ångledningen upp i två fall, ett för 0-40% effekt och ett för 40-100% effekt. Även denna modell har visat god överensstämmelse med uppmätta data (O1).

I [12] ges en komplex fysikalisk beskrivning av ångledningen. Här konstateras också att identifiering är att föredra framför att försöka bestämma parametrar ur de fysikaliska dimensionerna.

Insignaler och utsignaler till ångledningsmodellen är:

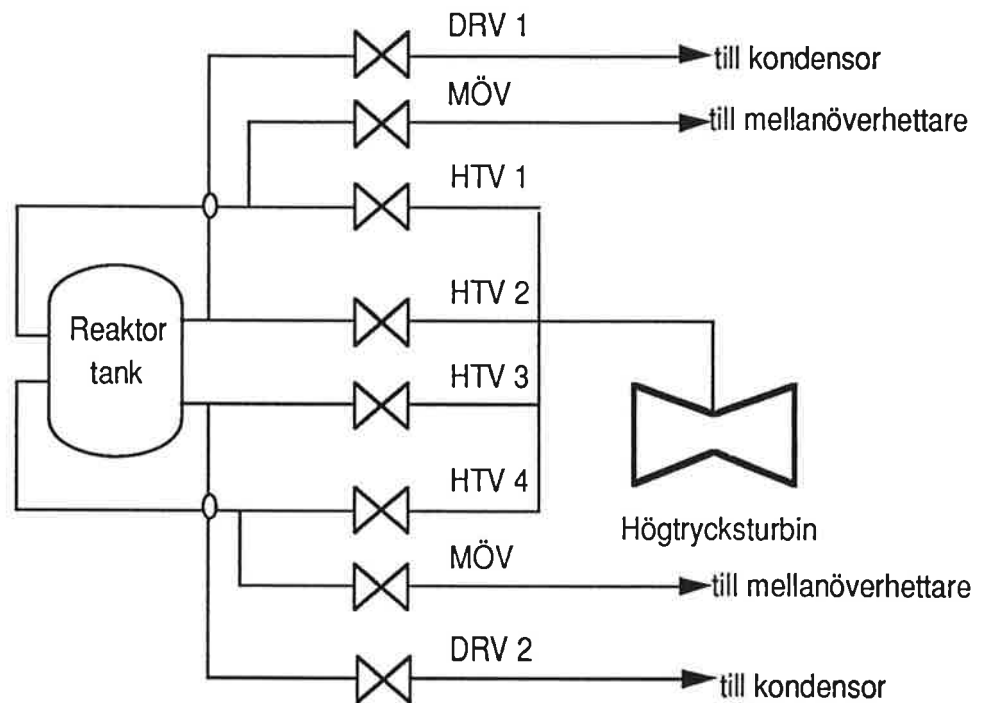
L <sub>H</sub> TV <sub>i</sub>	Läge högtrycksventil	[%]
L <sub>D</sub> RV <sub>i</sub>	Läge dumpreglerventil	[%]
L <sub>M</sub> ÖV <sub>i</sub>	Läge mellanöverhettarventil	[%]
P <sub>r</sub>	Reaktortryck	[bar]

Tabell 2.4. Insignaler.

$W_r$	Ångflöde från reaktorn	[kg/s]
$W_{HTV}$	Totalt flöde genom samtliga HTV	[kg/s]

**Tabell 2.5.** Utsignaler.

Anledningen till att  $W_{HTV}$  tas upp som utsignal är att denna är insignal till turbinmodellen (avsnitt 2.2.3).



**Figur 2.13.** Principskiss för ångledningsmodellen.

Modellen är uppbyggd av en statisk och en dynamisk del. Den statiska består av ventilernas karakteristiska funktioner, som bestämmer flödet genom respektive ventil som funktion av ventilläge. Den dynamiska modellen bestämmer ångflödet från reaktorn.

**Statisk modell**

Ångflödet genom HTV bestäms av

$$W_{HTV} = P_r(f_{HTV}(L_{HTV1}) + f_{HTV}(L_{HTV2}) + f_{HTV}(L_{HTV3}) + f_{HTV}(L_{HTV4}))$$



där  $f_{HTV}$  representerar den karakteristiska funktionen för en HTV.

På samma sätt gäller

$$W_{DRV} = P_r(f_{DRV}(L_{DRV1}) + f_{DRV}(L_{DRV2}))$$

och

$$W_{MÖV} = P_r(f_{MÖV}(L_{MÖV1}) + f_{MÖV}(L_{MÖV2}))$$

Det totala flödet genom ventilerna ges då av

$$W_s = W_{HTV} + W_{DRV} + W_{MÖV}$$

#### Dynamisk modell

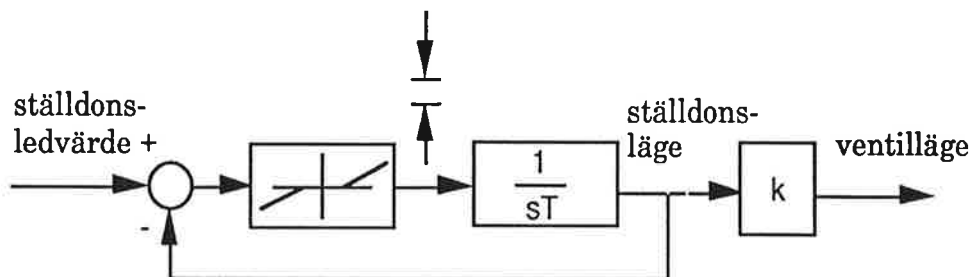
Ångflödet ut från reaktorn antas beror av totala flödet genom ventilerna enligt

$$W_r(s) = \frac{b_1s + b_0}{a_2s^2 + a_1s + a_0} e^{-s\tau} W_s$$

Den dynamiska modellen identifieras i avsnitt 6.2.

**Ventilmodell**

Överföringsfunktionen från önskat läge till verkligt läge består för samtliga ventiler ovan av en återkopplad integrator med dödband och begränsad ingång [11].



Figur 2.14. Ventilmodell.

**2.2.3 Turbin**

Den modell som här presenteras har använts i processmodellen för turbinregulatorn i Oskarshamn 2 [7]. I modellen ingår delmodeller av lågtryckventilens karakteristik, högtrycksturbin (HT), lågtrycksturbin (LT), mellanöverhettare (MÖH) samt en varvtalsmodell.

**Högtrycksventil**

Effekten från högtrycksturbinen är proportionell mot flödet genom HTV.

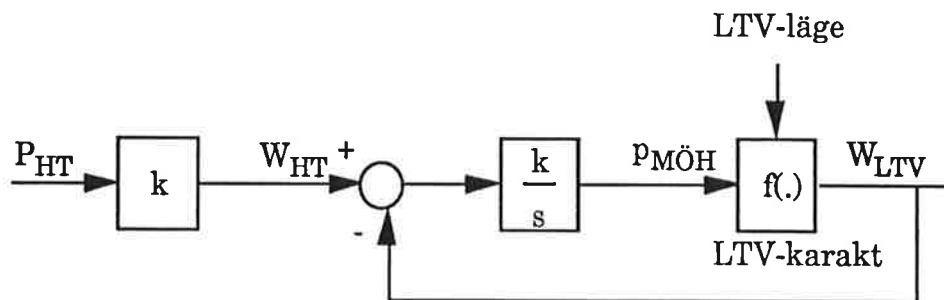
Insignal:	$W_{HTV}$	Flöde genom HTV	[kg/s]
Utsignal:	$P_{HT}$	Effekt från HT	[MW]

$$P_{HT} = \frac{k}{T_s + 1} W_{HTV}$$

**Mellanöverhettare**

Trycket i mellanöverhettaren modelleras som en integrator (kompressibel volym).

Insignaler:	$P_{HT}$	Effekt från HT	[MW]
	$L_{LTV}$	Läge lågtrycksventil	[%]
Utsignal:	$W_{LTV}$	Flöde genom LTV	[kg/s]



Figur 2.15. Mellanöverhettare.

**Lågtrycksturbin**

Lågtrycksturbinen fungerar på samma sätt som högtrycksturbinen.

Insignal:	$W_{LTV}$	Flöde genom LTV	[kg/s]
Utsignal:	$P_{LT}$	Effekt från LT	[MW]

$$P_{LT} = \frac{k}{T_s + 1} W_{LTV}$$

**Turbineffekt**

Totala turbineffekten är summan av HT- och LT- effekterna.

$$P_G = P_{HT} + P_{LT}$$

**Varvtalsmodell**

Varvtalsmodellen ger sambandet mellan turbineffekt och turbinvarvtal.

Insignal:	$P_G$	Turbineffekt	[MW]
Utsignal:	$w$	Turbinvarvtal	[rpm]

Sambandet fås ur följande momentekvation:

$$J \frac{dw}{dt} = T_G - T_L$$

där  $w$  anger varvtalet och  $T_G, T_L$  generatormoment respektive lastmoment. Multiplikation med  $w$  ger

$$Jw \frac{dw}{dt} = P_G - P_L$$

Efter fäsning är generatoren och därmed också turbinens varvtal låst till nätets frekvens. Turbinen kan därför lasta på utan att varvtalet ökar ( $P_G = P_L$ ).

Vid lastfrånslag eller upprullning/utrullning av turbin gäller

$$P_L = P_0 + Cw^2$$

$P_0$  Grundlast [MW]

$Cw^2$  Friktion [MW]

### Parameterbestämning för turbin- och varvtalsmodell

Ingen av de rapporter vi studerat har angett varifrån man hämtat konstanterna i turbinmodellen. Vi anser dock att dessa i de fall då de inte är kända enkelt bör kunna identifieras ur BISON. Förslag till BISON-specifikation återfinns i bilaga 5.

För varvtalsmodellen borde ingen processidentifiering vara nödvändig. Viktiga begrepp är anloppstid och utrullningstid. Anloppstiden beräknas som tidsderivatan av varvtalet vid lastfrånslag, varvtalet 3000 rpm och full ångtillförsel. Anloppstiden blir då den tid det skulle ta att nå varvtalet 6000 rpm om ändringshastigheten var konstant. Utrullningstiden anger tiden det tar från 3000 till 0 rpm vid strypt ångtillförsel.

I [4], [11] och [13] finns mer att läsa om turbin- och nätmodell.

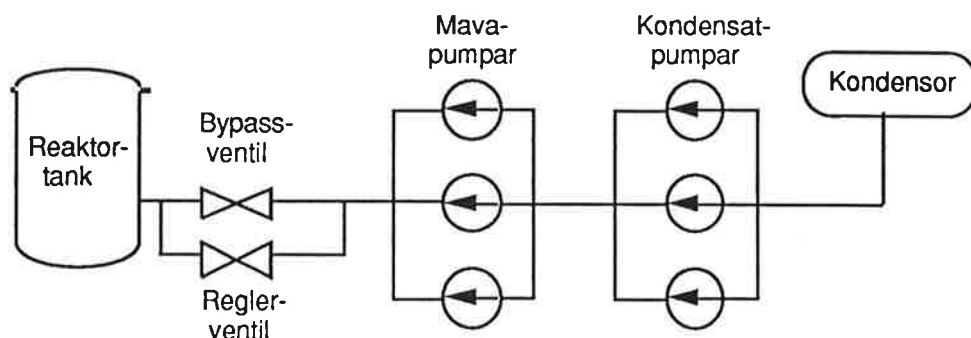
## 2.3 MATARVATTENSYSTEMET

Vid normal drift har matarvattenreglersystemet till uppgift att hålla vattennivån i reaktortanken konstant. Detta sker genom att via hydraulkopplingar styra mavapumparnas varvtal. Vid normalreglering är regler- och bypassventilerna helt öppna.

Vid låga matarvattenflöden regleras nivån genom att differensen mellan tryck efter mavapumpar och reaktortrycket hålls konstant. I detta fall reglerar man även med reglerventilen.

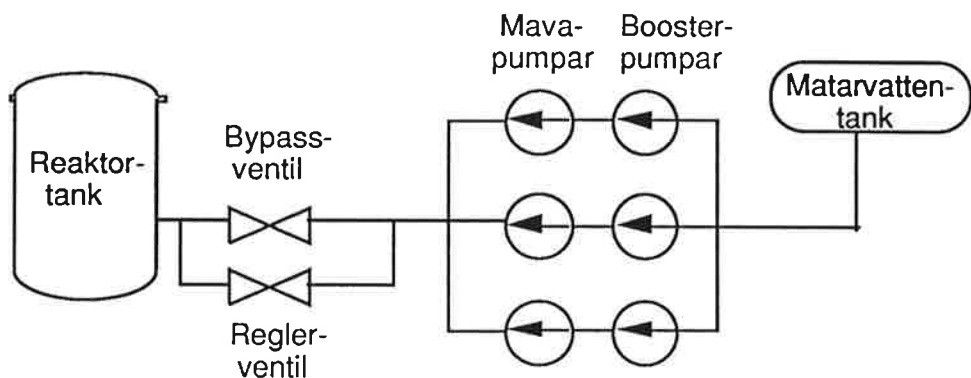
Insignaler till matarvattenreglersystemet är totalt ångflöde, mavaflöde, reaktornivå, nivåbövråde, reaktortryck samt regler- och huvudventillägen. I reaktorer med mer än en kondensor är dessutom kondensornivån insignal (för kondensorb balansering).

Matarvattensystemen för R1, O1/2, F1/2 och B1/2 har mycket gemensamt, även om tex antalet stråk varierar. I modellerna för dessa matarvattensystem ingår delmodeller för kondensor, kondensatpump, matarvattenpump, kompressibel volym, regler- och bypassventil samt reaktortank.



**Figur 2.16.** Matarvattensystem alternativ 1.

Matarvattensystemet i F3/O3 skiljer sig något från övriga verk genom att det finns en matarvattentank före mavapumparna. Dessutom tillkommer en boosterpump före varje mavapump.



**Figur 2.17.** Matarvattensystem alternativ 2.

### 2.3.1 Verk utan matarvattentank

#### 2.3.1.1 Kondensor

Kondensorn har till uppgift att kondensera lågtryckturbinens avloppsånga samt den dumpånga som vid vissa driftfall dumpas från reaktorn. Vid normal drift råder vakuum i kondensorn (0.04 bar i Forsmark 1) [14] [15].

Vi har antagit följande enkla modell för vattennivån i kondensorn, motsvarande reaktortankmodellen i [16].

Insignaler:

$W_{\dot{a}}$  Totalt ångflöde till kondensorn [kg/s]

$\dot{O}_k$  Matarvattenflöde från kondensorn [kg/s]

Utsignal:

$z$  Vattennivå i kondensorn [m]

$$z(s) = \frac{1}{sT}(W_{\dot{a}}(s) - \dot{O}_k(s))$$

Totala ångflödet till kondensorn utgörs av ångflödet genom ventilerna ( $W_s$  i avsnitt 2.2.2) minus den andel som leds bort för att värma upp matarvattnet i förvärmarna. Denna andel anges av dränagekvoten. Den ånga som utgör dränagekvoten passerar varken kondensorn eller kondensatpumpar. Ångan kondenseras istället i förvärmarna och trycksätts av dränagepumpar. Från mavarvattenpumparna och vidare är dränaget åter en del av det totala mavaflödet.

T beror här liksom i modellen för reaktortanken av tankens flödesarea A samt vattnets densitet  $\rho$ , vilken i sin tur är beroende av trycket. Densiteten som funktion av temperaturen vid aktuellt tryck ( $\approx 0$  bar) hämtas ur tabell. Tidskonstanten beräknas sedan enligt

$$T = \rho * A.$$

### 2.3.1.2 Kondensatpump

Kondensatsystemets huvuduppgifter är att trycksätta, transportera och förvärma kondensatet. Trycksättning och transport sker med hjälp av kondensatpumpar.

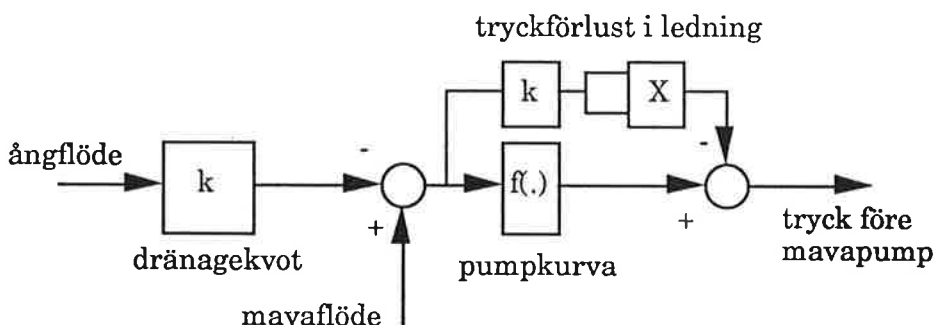
Kondensatsystemet är utformat för att vid full drift trycksätta kondensatet efter kondensorn till ca 35 bar och transportera detta till matarvattenpumparna. Kondensatet uppvärms dessutom via förvärmare till ca 120°C. (F1).

Trycket före mavarvattenpumparna ges av kondensatpumparnas uppfordringshöjd minus tryckförluster i ledningarna. Konstanten k för ledningsförlusten beräknas enkelt som tryckfall mellan kondensatpumparnas trycksida och mavarvattenpumparnas sug sida dividerat med tillhörande flöde i kvadrat.

Flödet genom kondensatpumparna utgörs av totala mavaflödet minus dränaget från förvärmarna, vilket trycksätts av dränagepumparna enligt avsnitt 2.3.1.1. Mavaflödet definieras som flödet efter mava- och bypassventil.

Modellen i figur 2.18 är hämtad från [17].

Insignaler: Ångflöde från reaktorn [kg/s]  
Mavaflöde [kg/s]  
Utsignal: Tryck före mavapump [bar]



Figur 2.18. Kondensatpump

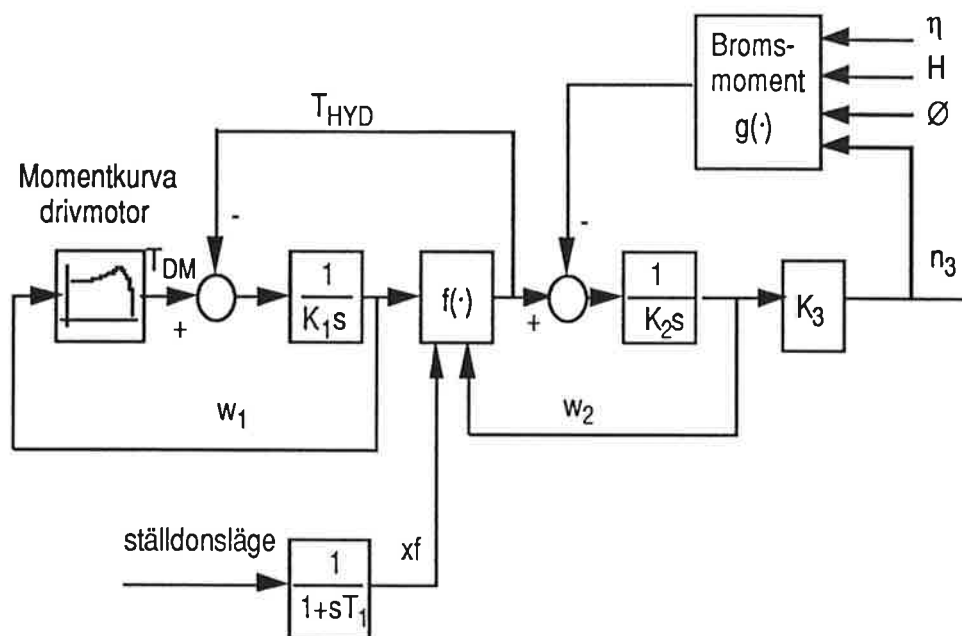
### 2.3.1.3 Matarvattenpump

Modellen av mavapumpen består av två delmodeller. Den första har ställdonsläge som insignal och pumpvarvtal som utsignal. Den andra går från varvtal till flöde.

#### Ställdonsläge till pumpvarvtal

Denna delmodell är hämtad från [1], som är skriven för O2.

Mellan drivmotorn och pumpen finns en hydraulkoppling och kuggväxel. Genom att reglera ett ställdonsläge i hydraulkopplingen ändras hydraulkopplingens fyllnadsgrad och därmed det överförda momentet. Modellerings av ställdon återfinns under avsnittet om extern HC-pump (2.1.1).



Figur 2.19. Hydraulkoppling.

$T_{DM}$	Moment från drivmotor	[Nm]
$T_{HYD}$	Överfört moment i hydraulkoppling	[Nm]
$\omega_1$	Vinkelhastighet drivmotor	[rad/s]
$\omega_2$	Vinkelhastighet utgående axel i hydraulkoppling	[rad/s]
$n_3$	Varvtal mavapump	[rpm]
$K_1$	Tröghetsmoment drivmotor	[kgm <sup>2</sup> ]
$K_2$	Tröghetsmoment hydraulkoppling (även pump)	[kgm <sup>2</sup> ]
$K_3$	Utväxling och övergång till varvtal	
$T_1$	Tidskonstant fyllnadsgrad	[s]
$\eta$	Verkningsgrad för mavapumpen	
$\emptyset$	Flöde för mavapumpen	[kg/s]
$H$	Mavapumpens uppforderingshöjd	[bar]
$f(\cdot)$	Momentkaraktistik för hydraulkopplingen	[Nm]
$g(\cdot)$	Bromsmoment mavapump	[Nm]

Tabell 2.1. Förklaring av beteckningar i figur 2.19.



Med en asynkronmotor som drivmotor sker matningen i normalfallet med konstant spänning och frekvens. Detta innebär att momentkurvan blir fast och varierar endast med motorvarvtalet. Det överförda momentet från drivmotorn till utgående axel bestäms av momentkaraktistiken för hydraulkopplingen. Inparametrar är ingående och utgående varvtal samt fyllnadsgraden. Övergången från ställdonsläge till fyllnadsgrad modelleras som en enkel tidskonstant.

Mavapumpens bromsande moment antas bestå av två delar, dels en förlustfaktor proportionell mot flödet i kvadrat, och dels en del härledd ur effektekvationen  $P=M \cdot \omega$ .

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{H \varnothing}{\eta \rho} \frac{1}{\omega}$$

där  $P$ =effekt,  $M$ =moment,  $\omega$ =vinkelhastighet,  $\rho$ =densitet och  $\eta$ =verkningsgrad. Variablerna hämtas från pumpkurvor och från nästa delmodell, varvtal till flöde. I [4] och [18] finns en utförligare beskrivning av tillvägagångssättet.

Med konstant varvtal för drivmotorn ges en förenklad modell enligt [20] av

$$G(s) = \frac{K_4}{1 + sT_2}$$

Insignal är ställdonsläget och utsignal mavapumpens varvtal.

Vid egna identifieringar på mätdata från Ringhals 1 bestäms överföringsfunktionen också till en tidskonstant och en förstärkning, se avsnitt 6.1.

#### Varvtal till flöde

Insignal:	Pumpvarvtal	[rpm]
	Tryck före pump	[bar]
	Tryck efter kompressibel volym	[bar]
Utsignal:	Flödet	[kg/s]

Pumpens uppföringshöjd bestäms av pumpkurvan om man känner till pumpvarvtal och flöde. Pumpflödet integreras fram ur tryckdifferensen mellan pumpens trycksida och regler/bypassventilen. Man tar hänsyn till den kompressibla volymen mellan pump och ventiler samt tryckförluster i pumpen. Under förutsättning att kvoten längd/area är känd för röravsnittet mellan pumpens trycksida och ventilerna kan tidskonstanten T beräknas enligt (härläds i bilaga 1)

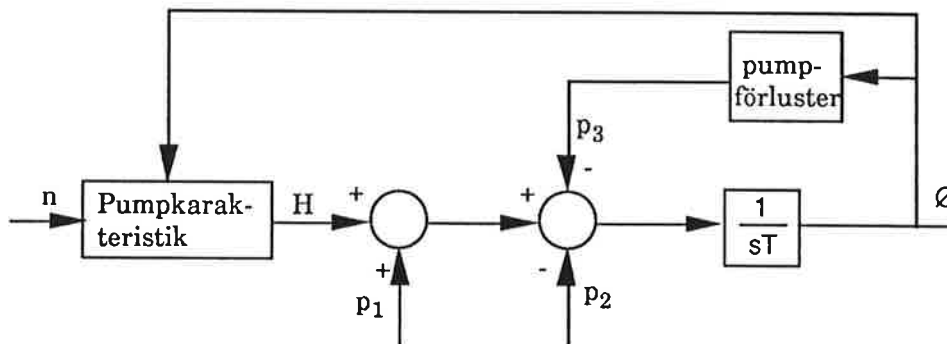
$$T = \frac{1}{10^5} * \frac{L}{A}$$

Tryckförlusterna i pumpen är proportionella mot flödet genom pumpen i kvadrat. Konstanten k ges alltså av sambandet

$$k = \frac{\Delta p_{pump}}{\varnothing^2}$$

$\Delta p_{pump}$  beräknas som tryck före pump plus uppföringshöjd minus faktiskt tryck efter pump.

Modellen i figur 2.20 är hämtad från [19] (processimulator till matarvattenregulatorn i O1). I [17] försummas tryckförlusterna i pumpen.



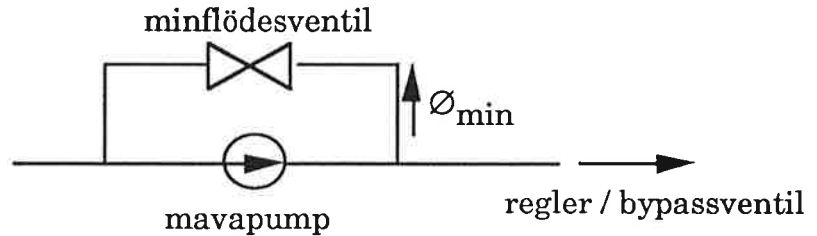
Figur 2.20. Flödesbestämning mavapump.

n	Pumpmotorvarvtal	[%]
H	Uppföringshöjd	[bar]
p1	Tryck före pump	[bar]
p2	Tryck efter kompressibel volym	[bar]
p3	Tryckförluster i pump	[bar]
Ø	Pumpflöde	[kg/s]

Tabell 2.2. Förklaring av beteckningar i figur 2.20.

**Minflöde**

För att skydda mavapumparna mot för låga flöden ligger parallellt med varje pump en minflödesledning med minflödesventil. Ventilen öppnas när flödet genom motsvarande pump understiger 175 kg/s och stängs när det överstiger 250 kg/s (O1). I figur 2.20 ovan antas minflödesventilen vara stängd.



**Figur 2.21.** Minflödesledning.

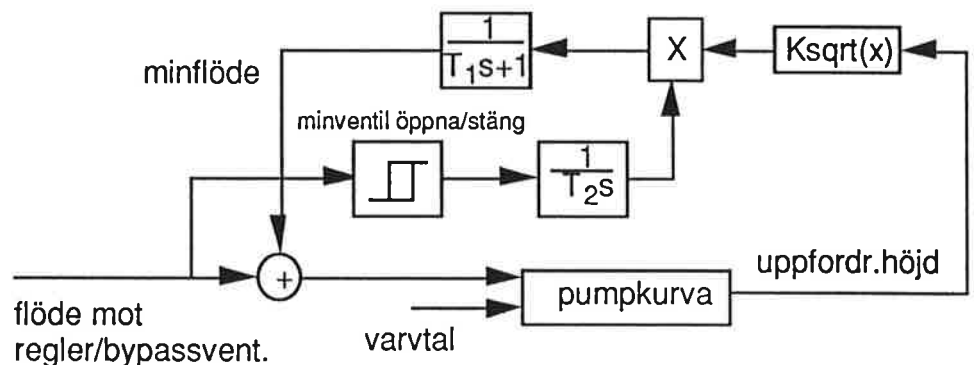
Minflödet  $\varnothing_{min}$  bestäms av tryckfallet  $\Delta p$  enligt

$$\varnothing_{min} = \frac{\sqrt{\Delta p}}{K}$$

Konstanten K kan alltså uppskattas vid känt minflöde och tryckfall (=pumpens uppfordringshöjd).

Totala flödet genom pumpen ges av flödet som går vidare mot regler/bypass-ventilen plus minflödet. Det är detta totala flöde man måste räkna med när man beräknar tryckförlusterna i pumpen.

Ventilens gångtid  $T_2$  och minflödesledningens tidskonstant  $T_1$  är information som hämtas från aktuellt verk [17].



**Figur 2.22.** Mavapump inklusive minflödesledning.

Minflöde modelleras i [4], [17] och [19].

## 2.3.1.4 Kompressibel volym

Genom att ansätta en volym mellan den punkt på trycksidan där pumparna löper samman och regler/bypassventilen tas hänsyn till vattnets kompressibilitet. Skillnaden mellan flödet innan och efter den kompressibla volymen, dvs flödet från pumparna efter minflödesförgreningen minus flödet genom regler/bypassventilen, påverkar den kompressibla volymen. För modellering av låglast bör kommentaren om recirkulationsflödet nedan observeras. Trycket före ventilerna integreras fram enligt

$$p = \frac{1}{sT}(\varnothing_1 - \varnothing_2)$$

Insignal:	$\varnothing_1$	Flöde innan komp. volym	[kg/s]
	$\varnothing_2$	Flöde efter komp. volym	[kg/s]
Utsignal:	p	Tryck efter komp. volym	[bar]

Den kompressibla volymen omfattar två pumpledningar och mavaledning fram till reglerventil och avstängningsventil. Med kännedom om denna volym  $V_0$  samt vattnets kompressibilitet  $\kappa$  beräknas den kompressibla volymen  $V$ . Kompressibiliteten är beroende av tryckskillnad (pumpens uppföringshöjd) samt vattnets temperatur.

$$V = \kappa * V_0$$

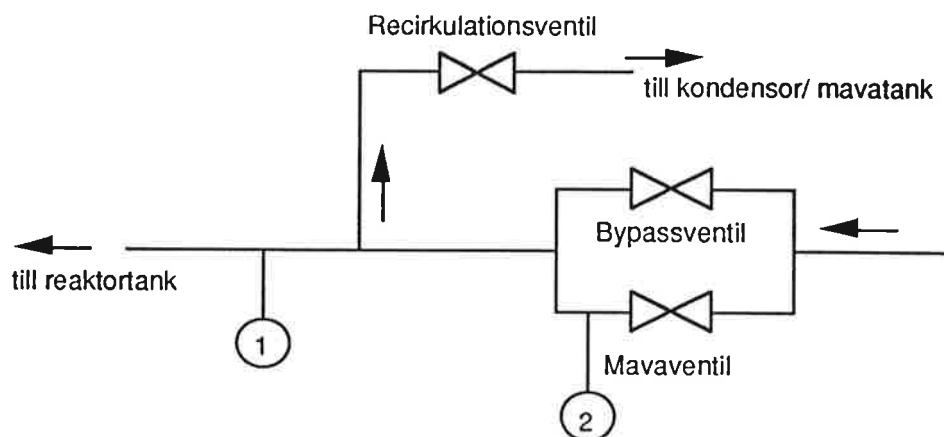
Integrationstiden  $T$  ges av den tid som krävs för att med nominellt flöde fylla den kompressibla volymen [4].

$$T = \frac{V * \rho}{\varnothing_0}$$

I [4] och [18] ansätts en kompressibel volym även mellan regler/bypassventil och skalventilen innan reaktortanken. Vi har dock, liksom i [17], valt att inte modellera denna kompressibla volym.

**Recirkulationsflöde**

Vid låga mavaflöden stängs bypassventilen och nivån regleras med mavaventilen eftersom varvtalsregleringen blir för grov. När bypassventilen stängs öppnas recirkulationsventilen. Via denna recirkuleras en del av mavaflödet tillbaka till kondensorn. Vid beräkning av flödet efter kompressibel volym vid låglast tas i vissa fall hänsyn till recirkulationsflödet.



**Figur 2.23.** Recirkulation.

Om mavaflödet alltid mäts som flödet mot reaktortanken (punkt 1 i figur 2.23) måste detta flöde adderas med recirkulationsflödet för att ge rätt flöde efter kompressibel volym. Detta sker t ex i process-simulatorens i [19].

I t ex F3 och O3 mäts mavaflödet direkt efter reglerventilen (punkt 2) vid de tillfällen då bypassventilen är stängd. Recirkulationsflödet behöver i detta fall alltså ej adderas till mavaflödet för att ge rätt flöde efter kompressibel volym. Däremot bör recirkulationsflödet subtraheras från mavaflödet för att ge flödet mot reaktortanken.

Om hänsyn ska tas till recirkulationsflödet vid modelleringen är det alltså väsentligt att notera var mavaflödet mäts. I [17] bortses helt från recirkulationsflödet vid simulering av nivå-reglersystemet.

#### Alternativ modell

Ett enklare alternativ är att modellera överföringsfunktionen från varvtal till flöde som en tidskonstant och en förstärkning [20].

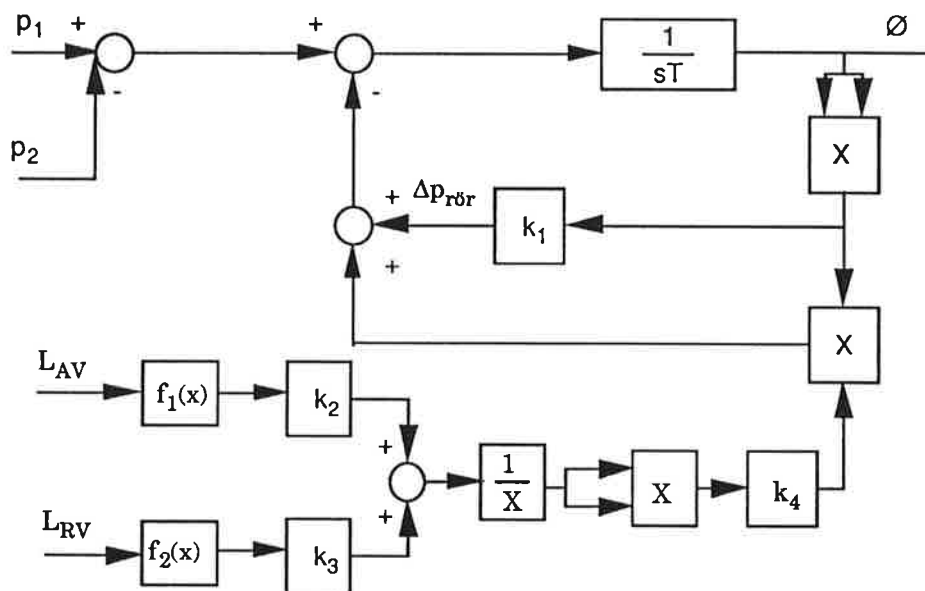
$$G(s) = \frac{k}{1 + Ts}$$

#### 2.3.1.5 Ventiler

För ventilmodellen gäller följande in- och utsignaler:

Insignaler:	Ventilläge	[%]
	Tryckfall över ventilen	[bar]
Utsignal:	Flöde genom ventilen	[kg/s]

Avstängningsventilen är normalt öppen och orsakar då relativt små tryckfall i mavaledningen. Vid låga mavaflöden är avstängningsventilen stängd och orsakar då tryckfall över reglerventilen som leder till att mavapumparna ger högre uppfordringshöjd än vid normal drift.



Figur 2.24. Ventilmodell.

Ø	Mavaflöde	[kg/s]
p1	Tryck innan ventil	[bar]
p2	Reaktortryck	[bar]
L <sub>AV</sub>	Ventilläge avstängningsventil	[%]
L <sub>RV</sub>	Ventilläge reglerventil	[%]

Tabell 2.3. Förklaring av beteckningar i figur 2.24.

Flödet integreras fram ur tryckfallet över ventilerna och mavaledningen fram till reaktortanken. I bilaga 1 beskrivs förhållandet fysikaliskt [18]. Integrationskonstanten T i figur 2.24 beräknas enligt

$$T = \frac{1}{10^5} \cdot \frac{L}{A}$$

L/A motsvarar förhållandet längd till area för avsnittet från ventilerna fram till reaktortanken.

**Tryckförluster i rör och ventiler**

Empiriskt gäller att tryckförlusterna i ett rör är proportionella mot kvadraten på flödet.

$$\Delta p_{\text{rör}} = k_1 \varnothing^2$$

Vid känt tryckfall mellan ventilerna och reaktortanken beräknas  $k_1$  enligt

$$k_1 = \frac{\Delta p_{\text{rör}}}{\varnothing^2}$$

För ventilförlusterna gäller

$$\Delta p_{\text{ventil}} = \frac{k_4 * \varnothing^2}{(k_2 * f_1(L_{AV}) + k_3 * f_2(L_{RV}))^2}$$

där  $f(L)$  motsvarar ventilarean som funktion av läget för respektive ventil [17]. Med kända värden på tryckfall respektive flöde för ventilerna kan konstanterna  $k_2$ ,  $k_3$  och  $k_4$  beräknas. För detaljer hänvisas här till [17]. Tryckförluster i ventiler behandlas även i [4] och [18].

**2.3.1.6 Reaktortanken**

Inparametrar till denna modell är:

$\varnothing$  Totala mavafloendet till reaktortanken [kg/s]

$W_r$  Ångflödet från reaktortanken [kg/s]

Utsignal är:

$z$  Tanknivån [m]

Nivån i reaktortanken bestäms av

$$\frac{dz}{dt} = k_1 (\varnothing - W_r)$$

Ångflödet från reaktorn tas som inparameter under förutsättningen att reaktortrycket hålls konstant, dvs att ångflödet är lika stort som ångproduktionen.

$k_1$  beror av flödesarea och densitet (reaktortryck) och bestäms på samma sätt som för kondensornivån (avsnitt 2.3.1.1). Vid beräkning av reaktortankens flödesarea bör dock hänsyn tas till att reaktortankens innandöme inte bara består av vatten. Modellen är hämtad från [16] och [17].

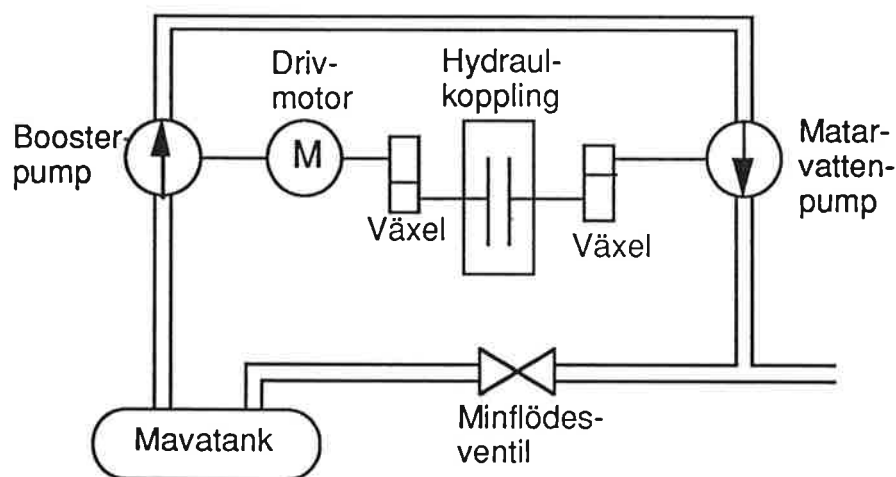
### 2.3.2 Verk med matarvattentank (F3, O3)

Rapporterna [4] och [18] är två användbara källor för modellering av matarvattensystemen i F3 och O3. För vissa delar kan man använda samma typ av modell som finns i föregående avsnitt, men modelleringen av matarvattentanken och ett pumppaket tillkommer. Notera också att modellen utgörs av området från matarvattentanken till reaktorn.

#### 2.3.2.1 Matarvattentank

Trycket i mavatanken antas vara proportionellt mot reaktor-effekten [18]. Trycket varierar mellan 0 och 8 bar (F3). Detta tryck motsvarar även boosterpumpens sugtryck [4] [18].

#### 2.3.2.2 Booster- och matarvattenpumppaket



Figur 2.25. Mava- och boosterpump.

Boosterpumpen och matarvattenpumpen drivs av en gemensam drivmotor, som matas med konstant spänning och frekvens. Mellan drivmotorn och matarvattenpumpen finns en hydraulkoppling med kuggväxlar på ingående och utgående axel. På samma sätt som i avsnitt 2.3.1.3 regleras matarvattenpumpens varvtal genom ett ställdon till hydraulkopplingen. Boosterpumpen går med konstant varvtal. Detaljerade modeller återfinns i [4] och [18].



### 3 REALISERING I MATLAB

SIMULINK är en utvidgning av MATLAB som ger möjlighet att på ett enkelt sätt bygga en systemmodell och simulera. Modellen byggs upp av olika block, exempelvis förstärkningar och integratorer. Det finns dessutom speciella block för analys av mätdata. Exempel på detta är block för spektralanalys och korrelationsanalys.

Delmodellerna och de sammankopplade systemen för effekt, tryck och nivå har realiserats i MATLAB och lagts in i SC-Arkiv/Gemensamt SC/Modelleringshandbok/Modeller. En förteckning över realiseringarna återfinns i bilaga 7. Ofta har vi använt oss av blocken integratorer och förstärkningar även för att realisera överföringsfunktioner av högre modellordning. Fördelen är att man därigenom har möjlighet att ange begynnelsevärden för integratorerna.

#### **Sammankoppling av delmodeller**

Innan man kopplar samman delmodellerna till kompletta system för nivå, tryck eller effektregering måste hänsyn tas till det aktuella verkets konstruktion, t ex antal och typ av HC-pumpar. De sammankopplade modeller vi realiserat i MATLAB bör ses endast som exempel på hur delmodellerna kan kopplas samman.

## 4 IDENTIFIERING

## 4.1 LINJÄR PROCESSIDENTIFIERING MED IDENTIFICATION TOOLBOX

I Identification Toolbox finns olika linjära modeller, t ex ARX, ARMAX och Box-Jenkins (BJ). Användarens uppgift är att välja modell, gradtal, samplingstid och förse modellen med in och utsignal. Problemet har därmed övergått till att bestämma parametrarna så att en specifik förlustfunktion minimeras. ARX-modellen utnyttjar minsta kvadratmetoden, medan ARMAX och BJ använder algoritmer för att iterera fram parametrarna genom att minimera ett prediktionsfel. Information om modellen lagras i en thetamatrix, som utgör grunden för de fortsatta beräkningarna och valideringen [21] [22] [23].

**ARX**

ARX modellerar skillnaden mellan modell och mätdata som vitt brus. Strukturen för ARX-modellen är:

$$A(q^{-1}) y(k) = B(q^{-1}) u(k-nk) + e(k)$$

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots + a_{na} q^{-na}$$

$$B(q^{-1}) = b_1 + b_2 q^{-1} + b_3 q^{-2} + \dots + b_{nb} q^{-nb+1}$$

$e(k)$  är vitt brus.

Modellen beräknas genom:

$$TH = arx([y \ u],[na \ nb \ nk],maxsize,T)$$

**ARMAX**

Om bruset i modellen för ARX inte är vitt kan man istället använda en ARMAX-modell. Skillnaden i struktur är att man inför ett C-polynom som verkar på brustermen. ARMAX-modellen får då följande utseende:

$$A(q^{-1}) y(k) = B(q^{-1}) u(k-nk) + C(q^{-1}) e(k)$$

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots + a_{na} q^{-na}$$

$$B(q^{-1}) = b_1 + b_2 q^{-1} + b_3 q^{-2} + \dots + b_{nb} q^{-nb+1}$$

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1 q^{-1} + c_2 q^{-2} + \dots + c_{nc} q^{-nc}$$

$e(k)$  är vitt brus.

Modellen beräknas genom:

$$TH = armax([y \ u],[na \ nb \ nc \ nk],maxiter,tol,lim,maxsize,T)$$

**Box-Jenkins**

Än större möjligheter att modellera brus fås genom att använda en Box-Jenkinsmodell. Denna har olika nämnarpolynom för sambandet mellan insignal-utsignal respektive sambandet mellan brus-utsignal.

$$y(k) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} u(k-nk) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})} e(k)$$

med

$$B(q^{-1}) = b_1 + b_2 q^{-1} + b_3 q^{-2} + \dots + b_{nb} q^{-nb+1}$$

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1 q^{-1} + c_2 q^{-2} + \dots + c_{nc} q^{-nc}$$

$$D(q^{-1}) = 1 + d_1 q^{-1} + d_2 q^{-2} + \dots + d_{nd} q^{-nd}$$

$$F(q^{-1}) = 1 + f_1 q^{-1} + f_2 q^{-2} + \dots + f_{nf} q^{-nf}$$

$e(k)$  är vitt brus.

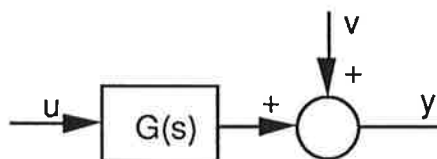
Modellen beräknas genom:

$$TH = bj([y \ u], [nb \ nc \ nd \ nf \ nk], maxiter, tol, lim, maxsize, T)$$

För samtliga ovanstående modeller kan *maxiter*, *tol*, *lim*, *maxsize* och *T* anges som tomma matriser, varvid parametrarna antar defaultvärden. Samplingstiden, *T*, bör dock anges för att få korrekt överföring till kontinuerlig tid och korrekta frekvensskalor i exempelvis Bodediagram.

**Spektralanalys**

En metod att skatta en överföringsfunktion är spektralanalys, som bygger på analys av signalernas frekvensinnehåll. Vi utgår från ett enkelt system där utsignalen fås genom  $y=G(s)u+v$ , där  $v$  är brus.



**Figur 4.1.** Generellt system.

En skattning av överföringsfunktionen fås genom

$$G(i\omega) = \frac{S_{yu}(i\omega)}{S_{uu}(i\omega)}$$

Insignalens autospektrum,  $S_{uu}(i\omega)$ , är ett mått på dess energitäthet och fås genom Fouriertransform av signalens autokovariansfunktion,  $C_{uu}(\tau)$ .

$$C_{uu}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T u(t)u^*(t-\tau)dt$$

$S_{yu}(i\omega)$  är korspektrum mellan  $y$  och  $u$  och fås genom Fouriertransformation av korskovariansfunktionen,  $C_{yu}(\tau)$ .

$$C_{yu}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T y(t)u^*(t-\tau)dt$$

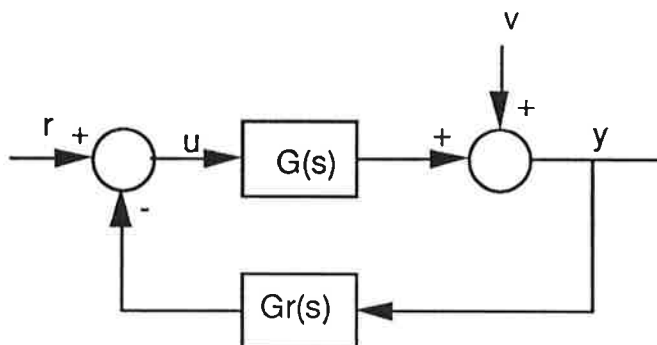
Denna metod i diskret form används i MATLAB-kommandot *spa*. Ofta används sedan Bodediagrammet för att validera en modell. För att ge tillförlitliga resultat krävs att  $u$  och  $v$  är okorrelerade. I fallet med återkoppling av utsignalen blir  $u$  och  $v$  korrelerade och metoden således osäker.

För höga frekvenser kan metoden ge skattningar med stor varians i förhållande till värdet av  $G(i\omega)$ , dels på grund av att brus-signalförhållandet i regel ökar med stigande frekvens, och dels på grund av att absolutbeloppet av  $G(i\omega)$  i regel faller med ökande frekvens. Vid frekvenser upp mot Nyquistfrekvensen får man dessutom se upp med samplingsinterferens.

I Identification Toolbox finns också kommandot *etfe*, som skattar överföringsfunktionen genom att Fourier-transformera utsignal och insignal, och sedan bilda kvoten av dessa.

### Återkoppling

Processer som är återkopplade kräver en viss försiktighet vid modelleringen. Vi illustrerar med ett exempel hämtat från [21].



Figur 4.2. Återkopplat system.

Processen  $G(s)$  regleras med en regulator  $Gr(s)$  som har börvärdet,  $r$ , noll. Dessutom ligger en störning på systemets utsignal. Det slutna systemet beskrivs då av:

$$y = \frac{1}{1 + G Gr} v$$

Sambandet mellan  $y$  och  $u$  blir dock tämligen meningslöst:

$$y = -\frac{1}{Gr(s)} u$$

En identifiering av systemet med hjälp av signalerna  $u$  och  $y$  skulle således leda till att man skattar inversa regulatorn med ombytt tecken. Slutsatsen blir därmed att man bör undvika en referenssignal på noll, och istället excitera systemet med exempelvis en PRBS-signal.

Även om man väljer rätt insignal fungerar spektralanalys dåligt på återkopplade system. Detta beror på att spektralanalysen blandar de två sambanden som gäller mellan insignal och utsignal i process och regulator.

Återkopplingens inverkan på modeller av typ ARMAX- och Box-Jenkins är inte lika problematisk. Om man har en proportionell regulator blir regulatorsambandet  $u(k) = -Ky(k)$ . I den linjära modellen med  $nk \geq 1$  finns däremot inget beroende mellan  $y(k)$  och  $u(k)$ . Återkopplingen ställer dock krav på att bruset modelleras riktigt.

Av ovanstående framgår att det är viktigt att känna till om det finns återkopplingar i systemet man ska modellera. Ett sätt att undersöka detta är genom korrelationsanalys av mätdata. Kommandot *cra* i Identification Toolbox är lämpligt att använda innan man modellerar.

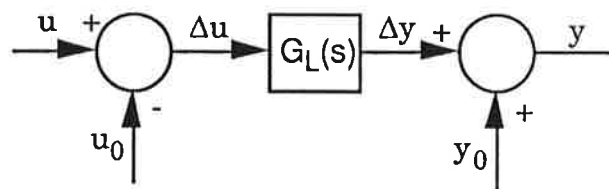
Ett alternativ är också indirekt identifiering. Principen är att man skattar det slutna systemets överföringsfunktion från referenssignal till utsignal. Om referenssignalen är okorrelerad med bruset ger nu även spektralanalysen korrekt resultat. Genom att vi förhoppningsvis känner regulatorn går det sedan att räkna fram den sökta överföringsfunktionen,  $G(s)$ , som

$$G(s) = \frac{G_{cl}(s)}{1 - G_{cl}(s)G_r(s)}$$

där  $G_{cl}(s)$  är det slutna systemets överföringsfunktion och  $G_r(s)$  är regulatorns överföringsfunktion.

### Linjärisering

Linjär systemidentifiering behandlar linjära modeller. Åtskilliga system i denna rapport är dock olinjära, och kräver linjärisering före applicering av metoderna. En linjäriseringsmetod är att dra respektive medelvärde från insignal och utsignal. I ett område kring denna arbetspunkt kan sedan systemet betraktas som linjärt. Principen finns återgiven i figur 4.3.



Figur 4.3. Principskiss linjärisering.

Den linjäriserade överföringsfunktionen  $G_L(s)$  gäller för avvikelserna  $(\Delta u, \Delta y)$  från arbetspunkten  $(u_0, y_0)$ .

Eftersom modellens giltighet är begränsad till regionen kring arbetspunkten och dynamiken i vissa delsystem uppvisar stora skillnader beroende på arbetspunkt måste identifieringar göras för olika arbetspunkter i arbetsområdet.

## 4.2 VALIDERING

Vid val av modell har man flera olika faktorer att ta hänsyn till. Val av modellordning kan göras genom att studera Akaikes FPE, de skattade parametrarna med standardavvikelser och pol-nollställediagram för modellen. Simulering av modellen med mätseriens insignal bör också stämma överens med systemets verkliga utdata. Genom att analysera residualerna fås också information om modellens förmåga att beskriva systemet. Jämförelse av modellens Bodediagram med Bodediagram erhållet genom spektralanalys av mätdata är ytterligare en valideringsmetod.

Tyvärr ger de olika kriterierna alltför sällan samma resultat beträffande modellval. Vid valet mellan modellerna får man istället göra en egen bedömning över vad som ska krävas av modellen och vilka frekvensområden som är intressanta att ha god överensstämmelse i.

### Val av mätdata

Generellt används en del av mätserien till att räkna fram en modell och en annan del av mätserien för validering i form av exempelvis residualanalys och simulering. Risken är annars att man kommer fram till en felaktig modell, som trots det kan den beskriva signalsambandet väl för de uppmätta mätpunkterna inklusive det specifika bruset. Däremot kan stora fel fås för andra insignaler.

### Akaikes FPE

En direkt jämförelse av förlustfunktionerna som erhållits för olika modeller är missvisande såtillvida att modeller med hög modellordning favoriseras. Ett alternativ är istället Akaikes Final Prediction Error, som utgörs av förlustfunktionen med tillägg av en strafffaktor. Denna strafffaktor ökar med antalet skattade parametrar. Syftet är att man ska undvika överanpassning, då de extra parametrarna endast anpassar modellen till de specifika störningarna i mätserien. Överanpassning leder dock inte till att modellen skulle klara en annan insignal bättre än en modell av lägre ordning. Värdet på Akaikes FPE fås i MATLAB genom kommandot *present*.

### Parametrar och standardavvikelser

Utöver Akaikes FPE visar *present* -kommandot bland annat också de skattade parametrarna med standardavvikelser, vilka man gärna vill erhålla låga för att kunna lita på modellen. B-polynomet inleds med nk stycken nollor. Skulle efterföljande koefficient vara i närheten av noll kan detta tyda på att man valt fördröjningen nk för liten.

**Pol-nollstäldiagram**

En plot av poler och nollställen visar om det är aktuellt att välja en lägre modellordning genom att förkorta bort närliggande poler och nollställen. För att plotta poler och nollställen i MATLAB används lämpligen *zpplot*, med argumentet *th2zp*, vars argument i sin tur är namnet på thetamatrisen.

**Simulering**

Simulering av modellen och utvärdering gentemot den verkliga utsignalen är en vanlig metod vid validering. Det är här bäst att använda en annan del av mätserien än den som skapade modellen. I MATLAB används lämpligen kommandot *idsim*.

**Bodediagram**

Bodediagrammet för modellen kan jämföras med ett Bodediagram erhållet genom spektralanalys av mätdata. I system med återkoppling skall man dock inte lita alltför mycket på spektralanalysen. Detta gäller även för de frekvenser där insignalen har dåligt energiinnehåll. I övriga fall är metoden användbar och lättöverskådlig. Ett Bodediagram plottas i MATLAB med exempelvis kommandot *bodeplot*.

**Residualer**

Residualanalys handlar om att undersöka prediktionsfelen i modellen. Modellen skriven på allmän form är

$$y(k) = G(q)u(k) + H(q)e(k)$$

Prediktionsfelen ges av

$$\varepsilon(k) = H^{-1}(k)\{y(k) - G(q)u(k)\}$$

Om modellen är korrekt skall prediktionsfelen vara vitt brus. Således bör prediktionsfelen vara oberoende av varandra, samt oberoende av insignalen, om det inte finns återkoppling i systemet. Med återkoppling ska prediktionsfelen vara oberoende av tidigare insignaler.

Ett sätt att kontrollera prediktionsfelens inbördes korrelation är autokorrelationstest. Autokovariansfunktionen för residualerna ges enligt [21] av

$$C_{\varepsilon\varepsilon}(\tau) = \frac{1}{N-\tau} \sum_{k=\tau+1}^N \varepsilon_k \varepsilon_{k-\tau}$$



Om antagandet ovan är sant gäller att

$$\sqrt{N} \frac{1}{C_{\varepsilon\varepsilon(0)}} [C_{\varepsilon\varepsilon(1)} \dots C_{\varepsilon\varepsilon(m)}]^T$$

är normalfördelat med väntevärde  $\mathbf{0}_{m \times 1}$  och varians  $\mathbf{I}_{m \times m}$ . Metoder finns för att testa antagandet statistiskt.

För att testa korrelationen mellan insignalen och residualerna används istället korskorrelationstest. Korskovariansfunktionen ges enligt [21] av

$$C_{u\varepsilon}(\tau) = \frac{1}{N-\tau} \sum_{k=\tau+1}^N \varepsilon_k u_{k-\tau}$$

Med vektorn  $r_{u\varepsilon}(m)$  och matrisen  $R_{uu}(m)$  definierade som

$$r_{u\varepsilon}(m) = \frac{1}{\sqrt{C_{\varepsilon\varepsilon(0)}}} [C_{u\varepsilon}(\tau+1) \dots C_{u\varepsilon}(\tau+m)]^T$$

$$R_{uu}(m) = \frac{1}{N-m} \sum_{k=m+1}^N \begin{bmatrix} u_{k-1} \\ \vdots \\ u_{k-m} \end{bmatrix} [u_{k-1} \dots u_{k-m}]$$

gäller om modellen är korrekt enligt antagandet ovan att  $\sqrt{N} r_{u\varepsilon}(m)$  är normalfördelat med väntevärde  $\mathbf{0}_{m \times 1}$  och varians  $R_{uu}(m)$ . Även i detta fall finns statistiska metoder att testa antagandet.

MATLAB-kommandot *resid* utför ovanstående tester och plottar dessutom ett konfidensintervall på 99 % för de båda korrelationerna. Om korskorrelationen mellan residualerna och  $u$  avviker från konfidensintervallet för negativa  $m$  är detta ett tecken på återkoppling.

### Invers sampling

Polynomen i ARX, ARMAX och Box-Jenkins ges i diskret form. Ofta är man också intresserad av den kontinuerliga motsvarigheten. Till hjälp i MATLAB finns exempelvis *thd2thc* för att överföra en diskret thetamatrix till kontinuerlig form. Den inversa samplingen är dock inte unik. Speciellt poler på negativa reella axeln, i origo och i punkten 1 kan ge konstiga resultat.

### Identifieringsprogram

När man utför själva identifieringen i MATLAB underlättas arbetet om man har färdigskrivna macron. Till en början använde vi macron där vi hade staplat olika kommandon för att exempelvis dela upp och linjärisera mätdata. I takt med att macrona växte och förökade sig blev det allt svårare att hålla koll på variabelnamnen och vad de stod för. Vi samlade då ihop våra macron i en m-fil, som sparades under namnet parbestprogr. Vi lade också till ett hjälpkommando för hur programmet används och fungerar. I bilaga 6 finns programmet utskrivet. Det kan också kopieras från biblioteket SC-Arkiv/Gemensamt SC/Modelleringshandbok.

Programmet är skrivet för MATLAB version 3.5. Vi har dock använt en nyare Identification Toolbox (version 3.0a), som vi har modifierat något för att få den att fungera ihop med MATLAB 3.5. Kommandon som inte finns i MATLAB 3.5 men som används i den nyare Identification Toolbox är bla clf reset och set.

Med programmet kan man:

- Dela upp och linjärisera mätdata
- Beräkna ARX-, ARMAX- och BJ-modeller
- Plotta Bodediagram
- Utföra residualtester
- Simulera modellen och jämföra med verkliga utdata
- Utföra korrelationsanalys
- Plotta pol-nollställediagram

För att programmet ska fungera krävs att man döper insignalen till u och utsignalen till y.

### 4.3 VAL AV INSIGNAL

Noggrannheten i skattningen av en överföringsfunktion beror till stor del på hur man valt insignalen vid upptagningen av mätdata. Frekvensspektrat hos insignalen ska vara tillräckligt energirikt i frekvensområdet man vill modellera. Dessutom är valet av samplingstid betydelsefullt. För lång samplingstid kan medföra att kunskap om systemets snabba dynamiska egenskaper går förlorad.

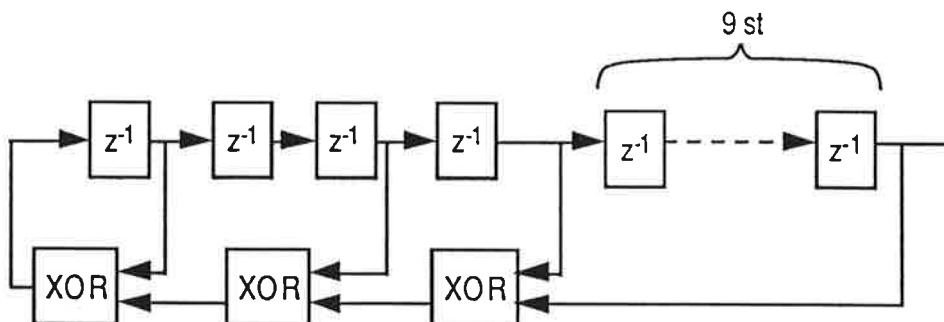
De rekommendationer som i avsnitt 5.2.5 ges för val av samplingstid, antal mätpunkter osv gäller både för BISON-simulering och verklig drift.

Insignalens amplitud får ej vara så stor att den överskrider den linjäriserade modellens giltighetsområde. Den bör av naturliga skäl inte heller vara så stor att den utlöser någon säkerhetsfunktion. Efter att ha tagit hänsyn till dessa begränsningar väljs amplituden så stor som möjligt för att få bästa möjliga signal/brus-förhållande.

Vid körningar på BISON i samband med identifiering tillförs generellt en störning till insignalen för att excitera systemet. Vissa störsignaler, tex sinus och ramper, finns att tillgå direkt i BISON. Andra, exempelvis PRBS-signalen, måste produceras externt och läsas in i BISON från en fil. I denna fil skall även tiden finnas lagrad.

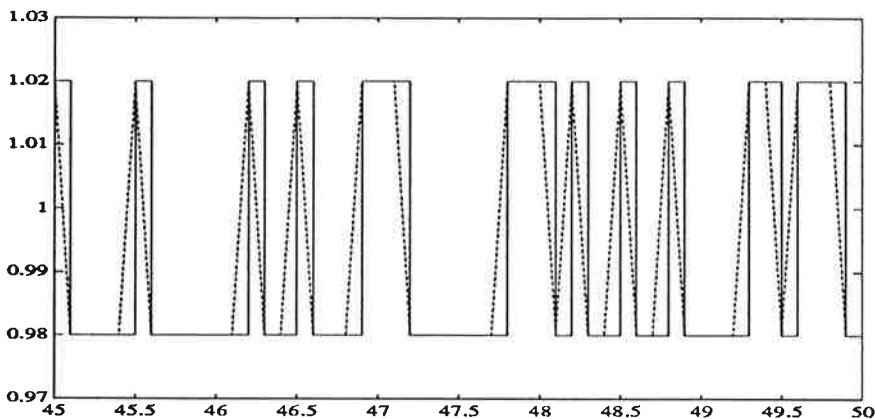
En PRBS-signal kan genereras med hjälp av ett antal diskreta fördröjningar och XOR-grindar. Exemplet nedan är hämtat från [21]. Kretsen arbetar utan yttre insignal och utsignalen kommer att vara en PRBS-sekvens bestående av ettor och nollor, förutsatt att inte samtliga begynnelsevärden hos fördröjningarna satts till noll.

Eftersom yttre insignal saknas och antalet tillstånd är ändligt kommer utsignalen att vara periodisk. Perioden för tillhörande autokorrelationsfunktion är  $(2^n - 1)h$ , där  $n$  är antalet enhetsfördröjningar i kretsen och  $h$  är samplingstiden.



**Figur 4.4.** Krets för skapande av PRBS-signal.

För körningen av ångledningsmodellen på BISON behövdes en PRBS-signal. Denna togs fram genom att realisera ovanstående modell i MATLAB, och simulera 1000 mätpunkter. Signalen normerades sedan till intervallet  $1 \pm 0.02$ . För att dessutom åstadkomma ZOH av signalen användes MATLAB till att lägga extra tidpunkter på avståndet 0.000 001 sekunder före sprången. Signalen före och efter ZOH-anpassning finns plottad i figur 4.5.



**Figur 4.5.** Del av PRBS-signalen före och efter ZOH-anpassning.

För att underlätta överföringen till BISON ordnas matrisen så att varje rad innehåller tre talpar (tid, signal). I bilaga 2 återfinns ett macro för ZOH-anpassningen, normeringen och ommöbleringen av filen.

## 5 BISON

Mätdata för identifiering hämtas antingen från verklig process eller från simuleringsprogrammet BISON. Med BISON finns möjlighet att simulera samtliga svenska samt flera utländska verk. I avsnitt 5.1 beskrivs för- och nackdelar med att hämta mätdata från BISON.

I dagens läge kräver en BISON-körning tillgång till ett makro som anger nödvändiga indata till programmet. Dessutom måste en PRBS-signal skapas och överföras till programmet i rätt format. Detta förfarande beskrivs steg för steg i avsnitt 5.2. Här redogörs också för de planer som finns på NTD för att i framtiden göra BISON mer användarvänligt.

## 5.1 NÄR LÄMPAR SIG BISON FÖR IDENTIFIERING?

Främsta syftet med BISON är missödesanalys. Delmodellerna i BISON är därför av olika omfattning beroende på hur viktiga de är för händelseförloppet i härden, uppkomst av transienter osv. Exempelvis är modellen för HC-pumparna komplex eftersom ett spänningsbortfall ger upphov till stora kylflödestransienter. På mavasidan däremot är modellerna i BISON inte mer omfattande än de modeller vi presenterar. Här är det bättre att räkna fram parametrarna och vid behov använda sig av mätdata från verklig drift eller kopiera modeller från BISON.

Fördelarna med att hämta mätdata från BISON är bla följande

- Nästan alla signaler är tillgängliga. I den verkliga processen är tex ångproduktionen inte mätbar.
- Störningar kan adderas till lämpliga signaler.
- Mindre mätbrus.
- Ekonomiskt gynnsammare än att utföra mätningar under verklig drift.
- BISON-beräkningar har god överensstämmelse med verkligheten.

Till nackdelarna hör att man behöver hjälp av en BISON-kunnig person med att bygga upp ett makro och att modellen för mavasystemet är betydligt enklare än övriga.

## 5.2 BISON-SIMULERING

Vid våra simuleringar i BISON har vi som inparameter använt färdigskrivna makron framställda på NTD. Dessa ger nödvändiga indata till BISON samt ger användaren möjlighet att enkelt ange insignal, simuleringstid, samplingstid samt driftfall. Nedan följer en beskrivning av hur vi kopplat upp oss mot UNIX-världen och överfört data, utnyttjat makron samt manipulerat in- och utdata till lämpligt format.

### 5.2.1 Kommunikation med UNIX

Vi har utfört BISON-körningarna genom att med programmet *NCSA Telnet* koppla upp en Mac på SCB mot en lämplig DEC-station. Här är det viktigt att man loggar in med en "rik-tig" UNIX-identitet för att få körningen att fungera. Inparameter till BISON är bla en PRBS-signal som skapas i MATLAB (se avsnitt 4.3). Överföring av MATLAB-filer sker enklast genom att man sparar dem i ascii-format (se *save* i MATLAB) och sedan transporterar dem till rätt adress med *ftp* (file transfer program). Detta program används även för att återföra mätserien till den egna datorn. För att hämta en fil används ftp-kommandot *get <filnamn>* medan kommandot *put <filnamn>* används i andra riktningen.

### 5.2.2 Start av simulering

För att ge BISON rätt indata har vi använt oss av makron som återfinns i *aron/ato/bisonkurs2/atoboli*. Som exempel har vi utfört en simulering av ångledning med filen *o2-steam-flow.input* som indata. Editorn *vi* används för att i input-filen infoga rätt simuleringstid, samplingsintervall, effekt, reaktortryck, HC-flöde samt relativt turbininloppsflöde. Det senare anges i form av en PRBS-sekvens som avviker  $\pm 2\%$  från nominellt värde. Matrisen med talpar (tid, rel. turbininloppsflöde) måste ha rätt format vilket närmare beskrivs i nästa avsnitt. Maximalt 5000 talpar får anges. Detta räcker dock mer än väl för våra behov. BISON-körningen startas med kommandot

```
bison -m 5.4 <inputfil>
```

Tillägget *-m* används för att ange version av BISON, vilket i vårt fall var 5.4. När simuleringen är klar konverteras BISON-plotfilen *x.supe* med programmet *mousup*. I *mousup* väljs alternativ 1 - överföring från binär till formaterad.

### 5.2.3 Dataformat

BISON kräver att samtliga inparametrar anges i exakt rätt format. I bilaga 3 återfinns den del av filen o2-steam-flow.input som ska manipuleras. Antal talpar måste här anges med sista siffran i position 12. Även talparen (tid, insignal) måste anges så som indikeras, dvs 12 positioner per tal samt 3 talpar per rad. För att styra över inläsningen av talpar till en fil skrivs här istället

```
=SELECT <filnamn>
```

Vi hämtar våra talpar från en matris i en MATLAB-fil (skapas i avsnitt 4.3). Denna matris som överförs i 8- alt 16-bitars ascii-format måste först manipuleras för att kunna läsas av BISON. Detta görs lämpligen med UNIX-programmet *awk* (pattern scanning and processing language), vilket söker igenom filer och väljer ut rader enligt vissa urvalskriterier. Dessa urvalskriterier samt de handlingar som ska utföras specificeras i egna program. För justering av ovan nämnda matris har vi skrivit ett enkelt program vid namn *format* vilket återfinns i bilaga 4.

Som utdata presenterar BISON efter konvertering med *mousup* enligt ovan dels en lista på aktuella signaler och dels ett antal block med värden på dessa signaler vid samtliga samplingstillfällen. Antalet presenterade signaler kan väljas från 39 och uppåt.

Vi hade i början problem med otillräckligt diskutrymme. BISON stannade efter ca 250 mätpunkter av 1000. Detta löstes genom att skala bort onödig information ur en av outputfilerna.

För att utvinna den information som var intressant i vårt fall och dela upp den på tre olika filer för tid, insignal och utsignal användes *awk* tillsammans med programmen *strip* och *feldeln* (bilaga 4). De kortare egna program vi här presenterar bör främst ses som exempel på hur man enkelt kan manipulera filerna. Beroende på vilka data som för tillfället är intressanta måste programmen naturligtvis modifieras. Här hänvisas till manualen för *awk*.

### 5.2.4 Framtida förbättringar av BISON

För att underlätta bla överföringen av mätdata finns planer på att skriva program för att kunna köra SIMULINK mot BISON. Detta beräknas kunna vara klart redan under våren -95.

Ett annat tänkbart projekt är en UNIX-baserad Windows-version av BISON där man enkelt klickar sig fram hela vägen från val av verk och vidare.

I framtida versioner av BISON är det också möjligt att antalet tillgängliga störssignaler i programmet utvidgas till att omfatta även tex PRBS-signaler. I dag utgörs utbudet av störssignaler främst av sinus och ramper.

### 5.2.5 Specifiering av BISON-körning

En specifikation av en BISON-körning ska ange

- insignal (inklusive beskrivning av ev störning)
- utsignaler
- samplingstid
- mättid
- effekt
- reaktortryck

I bilaga 5 har vi specificerat in- och utsignal för de delmodeller där en BISON-simulering kan vara aktuell. För att uppnå ett riktigt resultat krävs dessutom att man tar hänsyn till hur de olika delarna i systemet påverkar varandra, vilka återkopplingar som finns osv.

Samplingstiden väljs utifrån processens dynamiska egenskaper. För lång samplingstid leder till att snabba dynamiska förlopp inte uppfattas. Om samplingstiden väljs för kort får man en ohanterlig mängd data och riskerar att missa långsamma dynamiska förlopp. En lämplig samplingstid är motsvarande 10% av stigtiden för processens stegsvar [24]. Vid tidigare utförda simuleringar i identifieringssyfte har samplingstiden 0.1s använts för samtliga fall utom ångledningen där man valt samplingstiden 0.05s. Dessa värden kan ses som en rekommendation för att få en lagom storleksordning på samplingstiden [25] [26].

Mättiden har vi i samtliga fall valt så att vi får 1000 mätpunkter att analysera. Ena hälften används till identifiering och andra till validering.



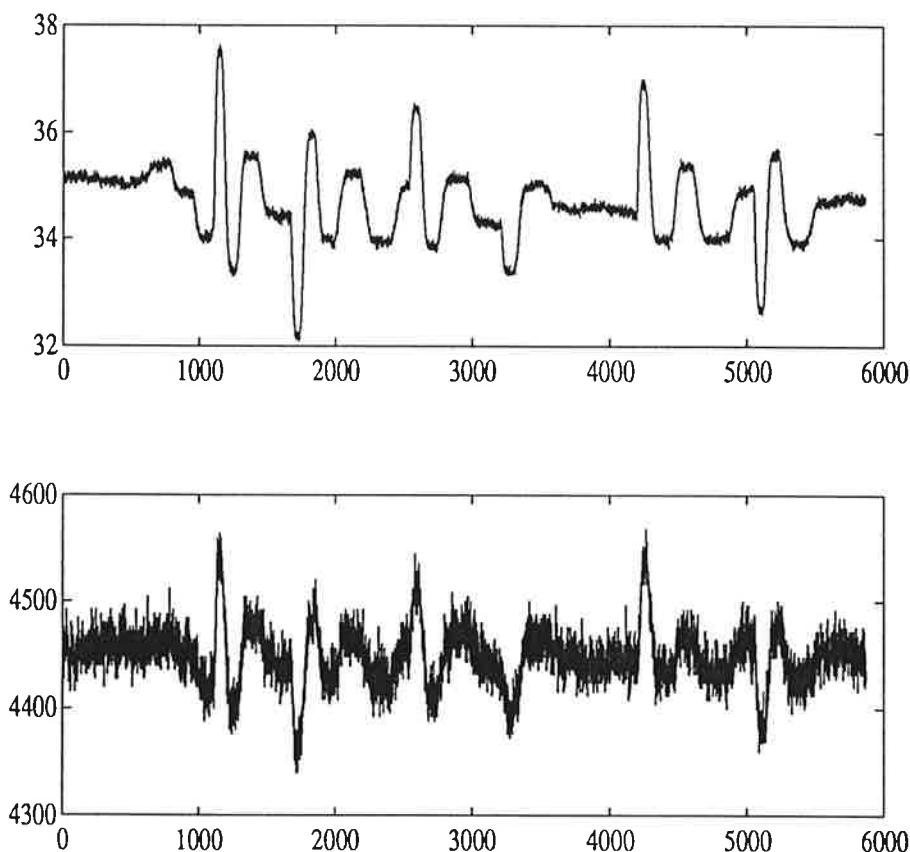
Simulering utförs lämpligen för ett par olika effektfall inom det effektintervall som ska täckas av modellen. Eftersom våra modeller gäller för "normal drift" simulerar vi fall mellan 60% och 100% reaktoreffekt.

## 6 EXEMPEL PÅ IDENTIFIERING

För att demonstrera hur identifieringen kan gå till har vi identifierat två processer. Avsnitt 6.1 innehåller identifiering av ställdonsläge till varvtal för en matarvattenpump i Ringhals 1. Här utgörs signalerna av mätdata från ett prov på verket. I avsnitt 6.2 identifieras ångledningsmodellen för Barsebäck 2 med hjälp av mätdata från BISON.

### 6.1 IDENTIFIERING STÄLLDONSLÄGE TILL VARVTAL FÖR MATARVATTENPUMP

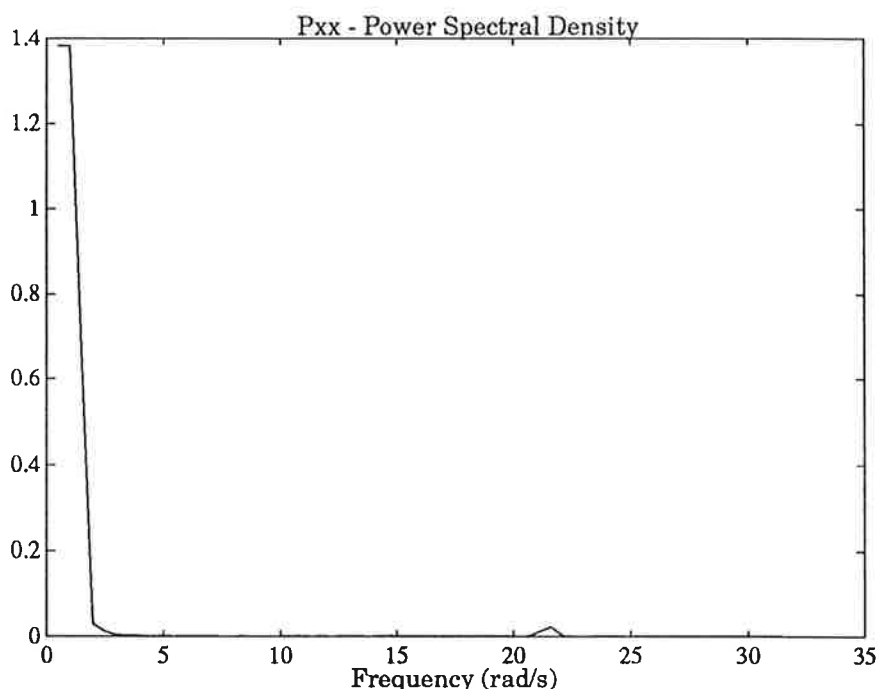
Vi har använt oss av mätdata från en matarvattenpump i Ringhals 1. Mätningarna är utförda 93-08-25. Mätserien omfattar 5870 punkter och samplingstiden är 0.1 s. Enheten för ställdonsläget är % och varvtalet ges i rpm. Signalerna finns plottade i figur 6.1, och som det framgår av bilden förekommer det en hel del brus.



**Figur 6.1.** Övre delen är ställdonsläget och undre varvtalet.

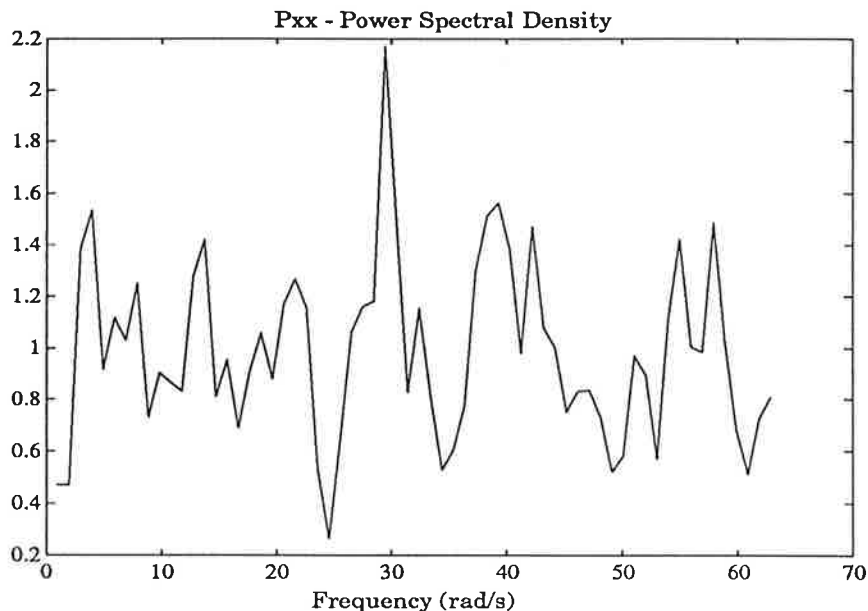
Vi använder oss vid identifieringen av en linjäriserad modell. Linjäriseringen har gjorts genom att subtrahera respektive medelvärde från in- och utsignal. Modellens arbetspunkt blir därmed ställdonsläget 34.68 % och varvtalet 4449 rpm.

Mätserien omfattar närmare 10 minuter, och innehåller förutom bruset endast låga frekvenser. Figur 6.2 visar spektraltätheten för den linjäriserade insignalen. För att beräkna detta spektrum har vi utnyttjat kommandot *spectrum* i Signal Processing Toolbox. Som synes innehåller signalen nästan uteslutande frekvenser upp till ca 2 rad/s. Detta leder till att identifieringen som genomförs nedan kommer att sakna mening för högre frekvenser. Detta syns tydligast i Bodediagram som erhållits via kommandona *spa* och *etfe*.



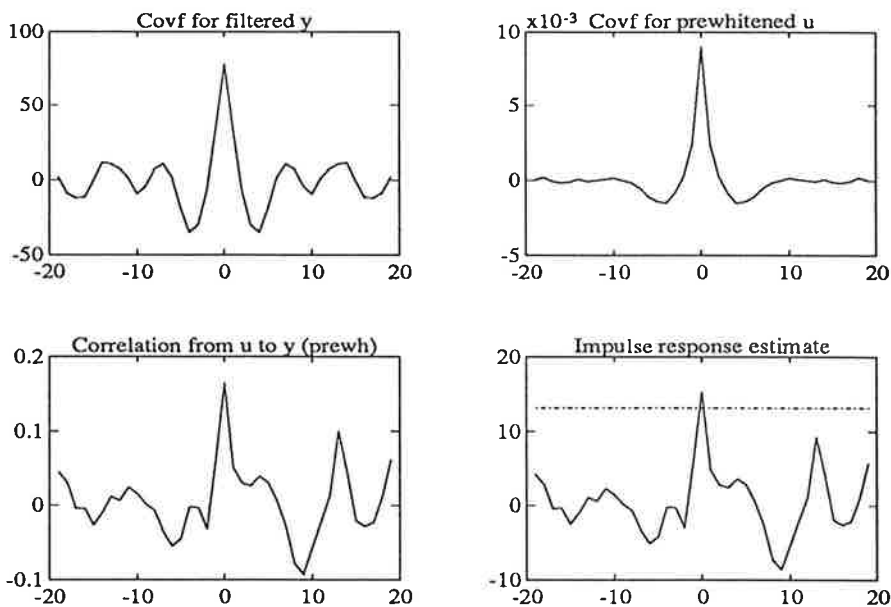
**Figur 6.2.** Spektraltätheten för insignalen.

Som jämförelse visar vi i figur 6.3 spektraltätheten för den PRBS-signal som användes vid BISON-identifieringen i avsnitt 6.2.



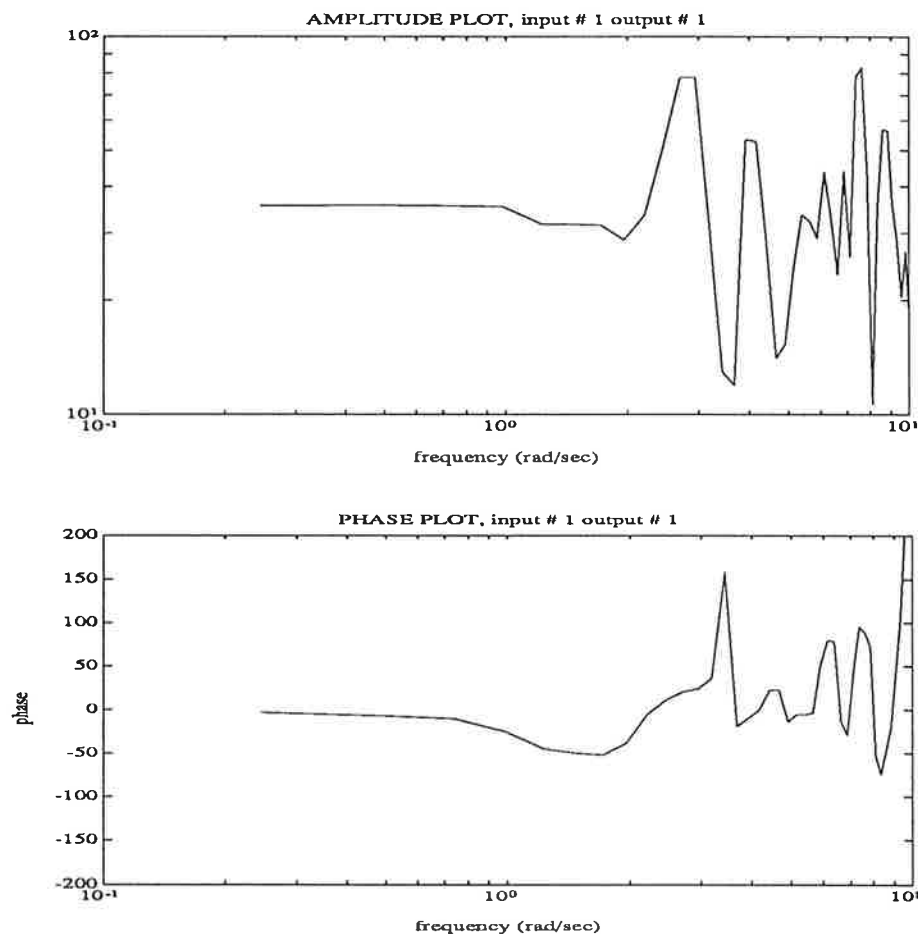
**Figur 6.3.** Spektraltäthet för PRBS-signal i avsnitt 6.2.

För att undersöka återkopplingen av varvtalet till ställningsläget som fås på grund av varvtalsregulatorn utfördes korrelationsanalys av mätdata. Resultatet återfinns i figur 6.4 och vi ser inget tecken på återkopplingen.



**Figur 6.4.** Korrelationsanalys.

Bodediagram för linjäriserade mätdata återfinns i figur 6.5. Amplitudkurvan och faskurvan har erhållits genom Fouriertransform (*etfe* i MATLAB). Med god vilja urskiljs en brytpunkt vid  $\omega \approx 1$  rad/s innan resultatet spårar ur för högre frekvenser.



**Figur 6.5.** Bodediagram linjäriserade mätdata.

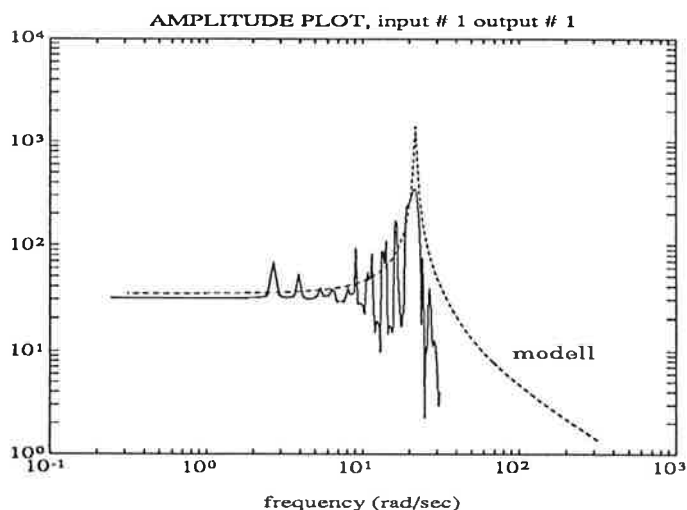
Vi har provat att identifiera dels med ofiltrerade signaler, dels med filtrerad in- och utsignal. Tillvägagångssättet har varit att efter linjärisering och eventuell filtrering dela upp mätdata i två halvor. Den första halvan har använts till att ta fram en modell i theta-format. Övergången till kontinuerlig överföringsfunktion har sedan gjorts med kommandot *thd2thc*. Den andra halvan av mätdata har använts vid valideringen.

Kriterier för att rangordna modellerna har varit:

- Akaikes FPE.
- Standardavvikelserna för de skattade parametrarna.
- Överensstämmelse vid låga frekvenser mellan Bodediagram för modell och mätdata.
- Överensstämmelse mellan simulerade utdata från modell och verkliga mätdata.
- Residualer.

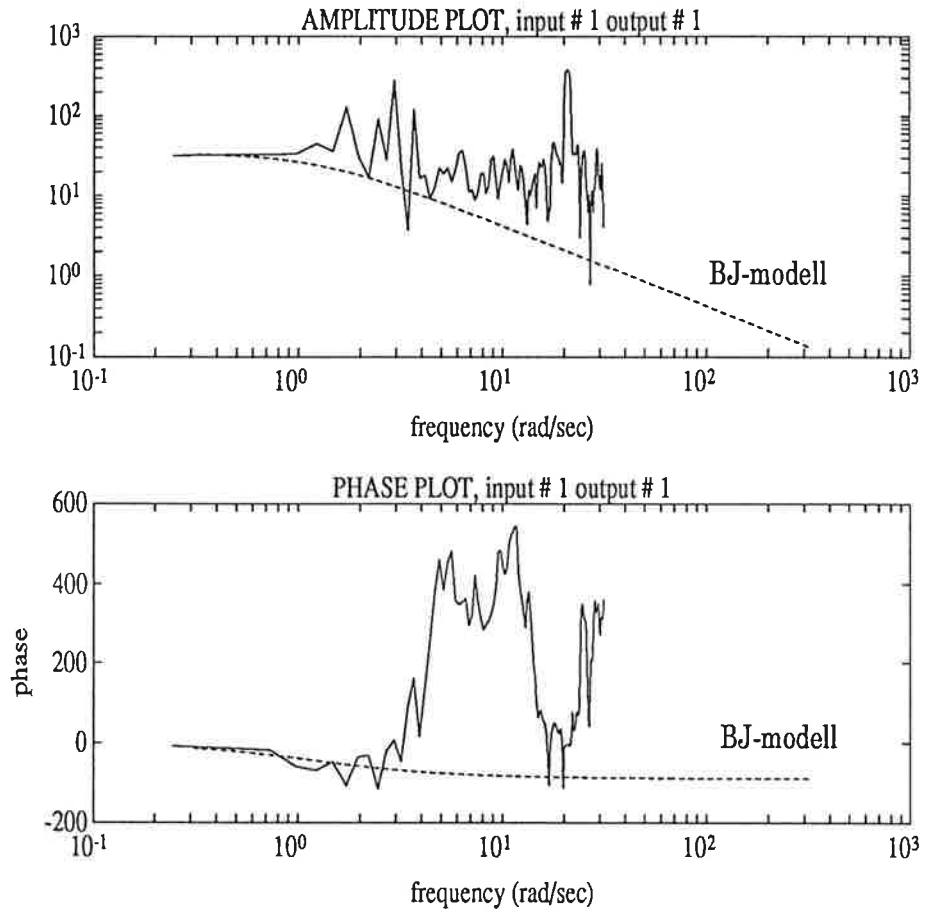
### 6.1.1 Identifiering med ofiltrerade signaler

Vi har i huvudsak experimenterat med olika ARMAX och Box-Jenkins modeller. Bäst resultat har uppnåtts för BJ-modeller av låg modellordning och med hög ordning på brus-termerna. Generellt har de högre modellordningarna anpassat sig till oegentligheterna för höga frekvenser genom att lägga in resonanstoppar, se figur 6.6.



**Figur 6.6.** Amplitud för modell ARMAX [2 2 2 1] och amplitud erhållen ur spektralanalys av mätdata.

Betydligt bättre resultat uppnås vid val av lägre ordning på insignal-utsignal polynomen, och högre modellordning för brus-termerna. Bäst resultat vad gäller Akaikes FPE och standardavvikelser gav en Box-Jenkinsmodell av ordningen [1 4 4 1 1]. Bodediagram för denna modell återfinns i figur 6.7 och i tabell 6.1 är modellen sammanfattad.

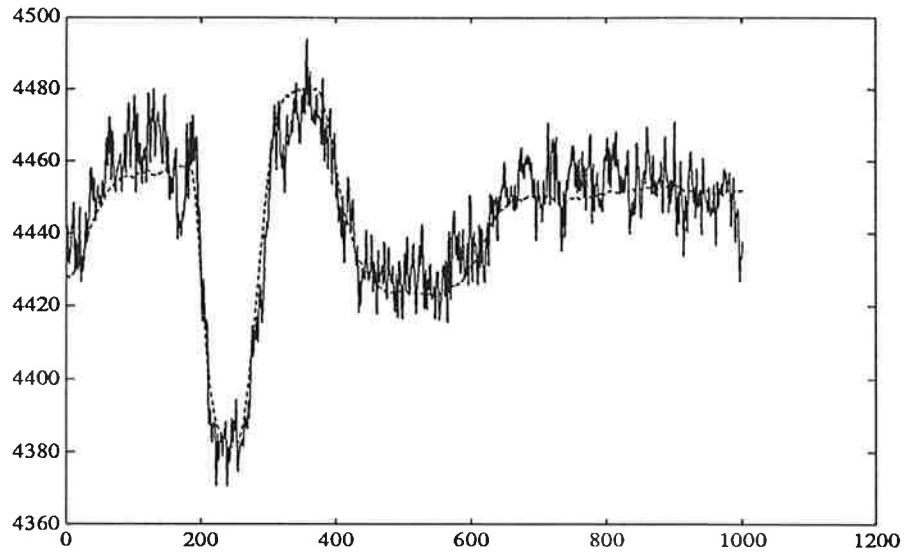


**Figur 6.7.** Bodediagram för BJ-modell [1 4 4 1 1] och Bodediagram erhållet ur spektralanalys av mätdata.

NUM	40.84
$\sigma$	2.90
DEN	$s + 1.20$
$\sigma$	0.09
Akaike's FPE	89.44
G(0)	34.03

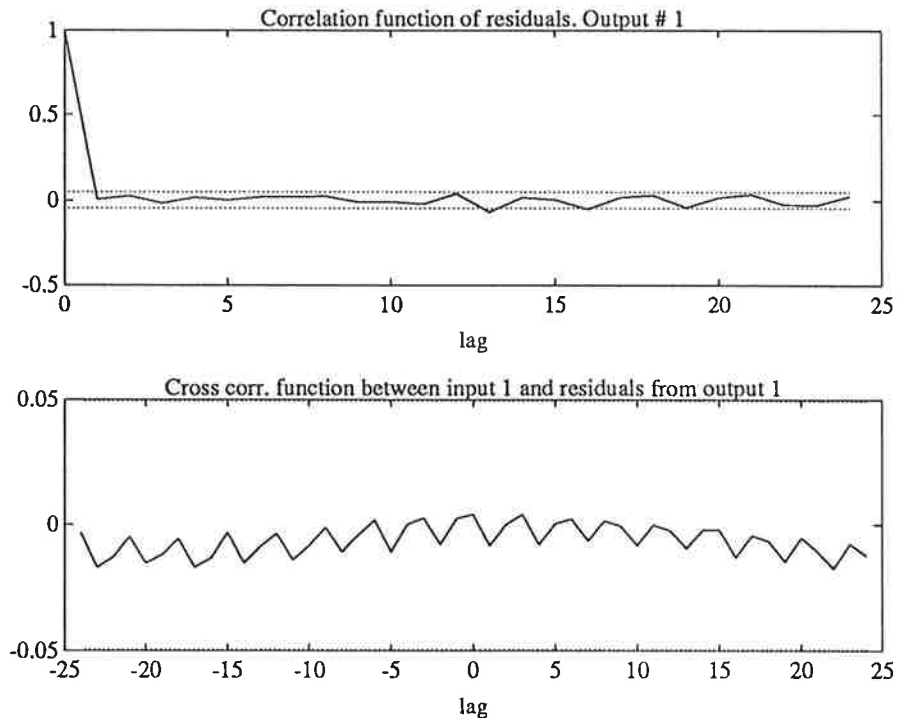
**Tabell 6.1.** Box-Jenkinsmodell [1 4 4 1 1].

Samtliga modeller gav likvärdiga resultat vid simulering av systemet med mätseriens insignal, se figur 6.8. Insignalen är inte speciellt krävande och utsignalen beror därför i första hand av den statistiska förstärkningen.



**Figur 6.8.** Simulering av Box-Jenkins [1 4 4 1 1] tillsammans med uppmätt varvtal.

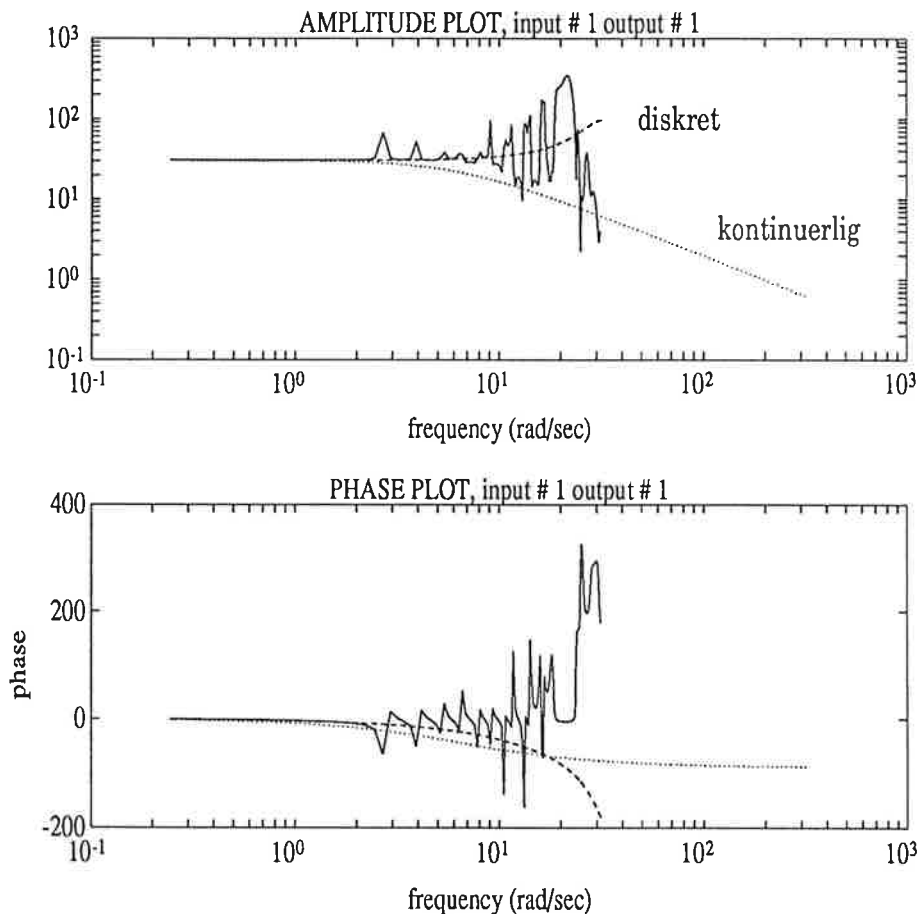
Korrelationen mellan residualerna och korskorrelationen mellan insignal och residualerna återfinns i figur 6.9. Som synes ligger funktionerna inom konfidensintervallen.



**Figur 6.9.** Residualtest.



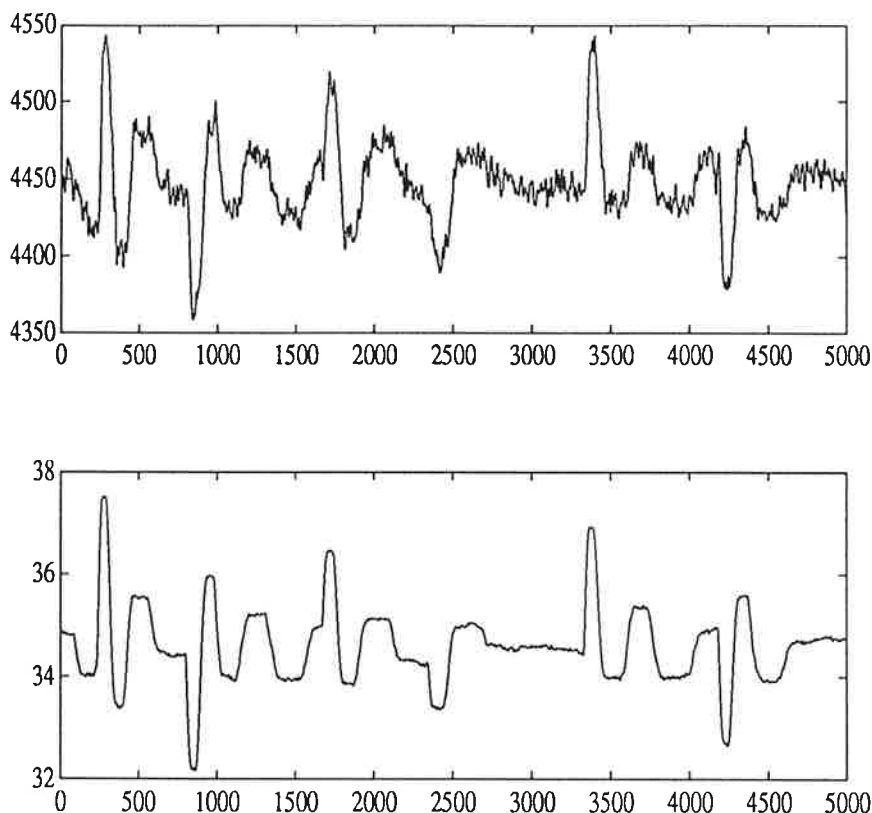
Noggrannheten vid övergången från diskret till kontinuerlig tid blir ibland dålig. MATLAB-funktionen *thd2thc* för överföring av theta-matrisen från diskret till kontinuerligt format gav flera gånger felaktiga resultat för ARMAX-modellerna. Detta upptäcks genom jämförelse mellan Bode-diagrammen för den diskreta modellen och motsvarande kontinuerliga. Figur 6.10 visar ett exempel på detta.



**Figur 6.10.** Exempel på skillnader i diskret och kontinuerlig modell.

**6.1.2 Identifiering med filtrerade signaler**

Vid identifiering med filtrerade signaler har rimliga resultat uppnåtts både med ARMAX och Box-Jenkins modeller. Vi valde att filtrera både in- och utsignal med ett fjärde ordningens Butterworth-filter. Brytpunkten för filtret var ca 4 rad/s. Som synes i figur 6.11 innehåller mätdata fortfarande brus, men på grund av tidskonstanten på ca 1 rad/s som erhållits vid det ofiltrerade försöket valdes inte lägre brytpunkt för filtret.



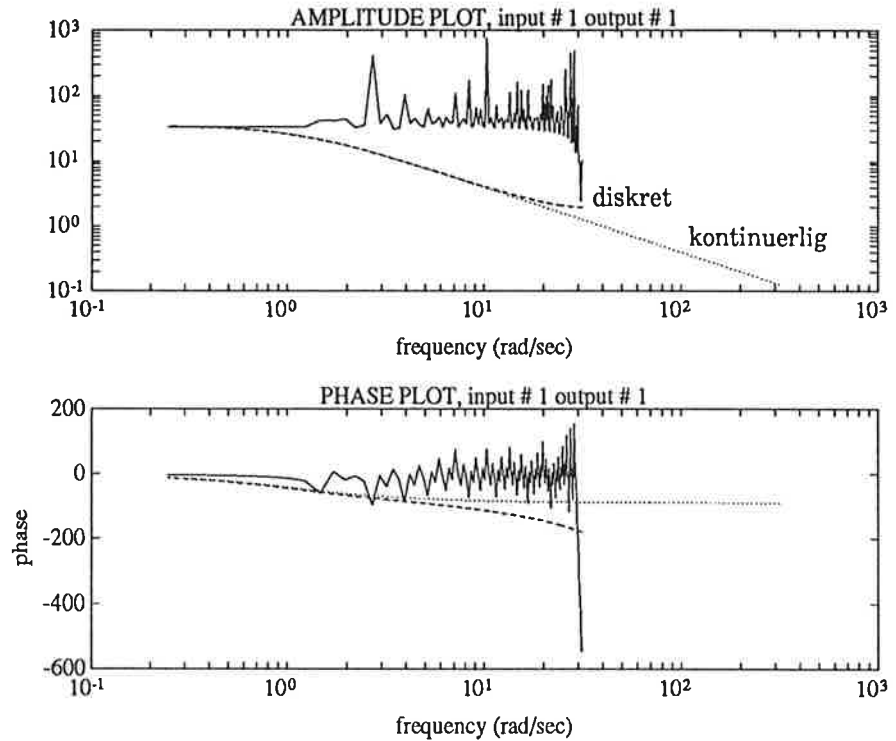
**Figur 6.11.** Filtrerad utsignal och insignal.

Olika modellordningar på framförallt ARMAX- och BJ-modeller testades. Bäst resultat uppnåddes med modeller som i stor utsträckning stämde överens med modellerna från försöket med ofiltrerade signaler. I tabell 6.2 nedan är en ARMAX-modell och en BJ-modell sammanfattade. Den stora skillnaden i Akaikes FPE beror på Box-Jenkins större möjligheter att modellera brus.

	ARMAX [1 1 2 1]	BJ [1 2 3 1 1]
NUM	42.0234	39.9027
$\sigma$	1.1158	0.7540
DEN	$s + 1.2200$	$s + 1.1483$
$\sigma$	0.0329	0.0297
Akaikes FPE	1.123	0.0007728
G(0)	34.45	34.75

**Tabell 6.2.** Modellerna ARMAX [1 1 2 1] och BJ [1 2 3 1 1].

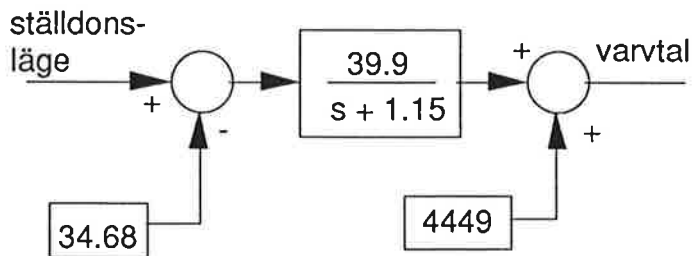
Bodediagrammet för BJ-modellen återfinns i figur 6.12.



Figur 6.12. BJ [1 2 3 1 1].

**Resultat**

Överföringsfunktionen från ställdonsläge till varvtal har identifierats till



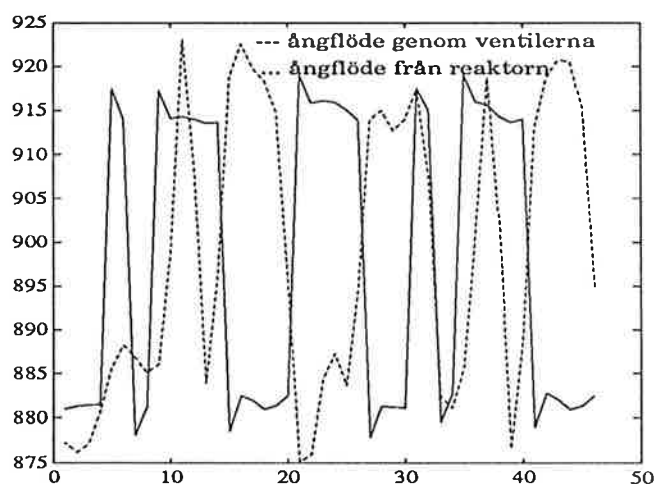
Figur 6.13. Modell.

Eftersom pumpens arbetsområde ligger mellan 4000 och 6200 rpm, och sambandet mellan ställdonsläge och varvtal är olinjärt är det viktigt att notera att modellens giltighet inskränker sig till området kring linjäriseringspunkten. Dessutom innehöll insignalen nästan enbart frekvenser under 2 rad/s. Dynamiken för högre frekvenser är därför okänd och omfattas ej av modellen.

## 6.2 IDENTIFIERING AV ÅNGLEDNINGSMODELLEN MED BISON-MÄT-DATA

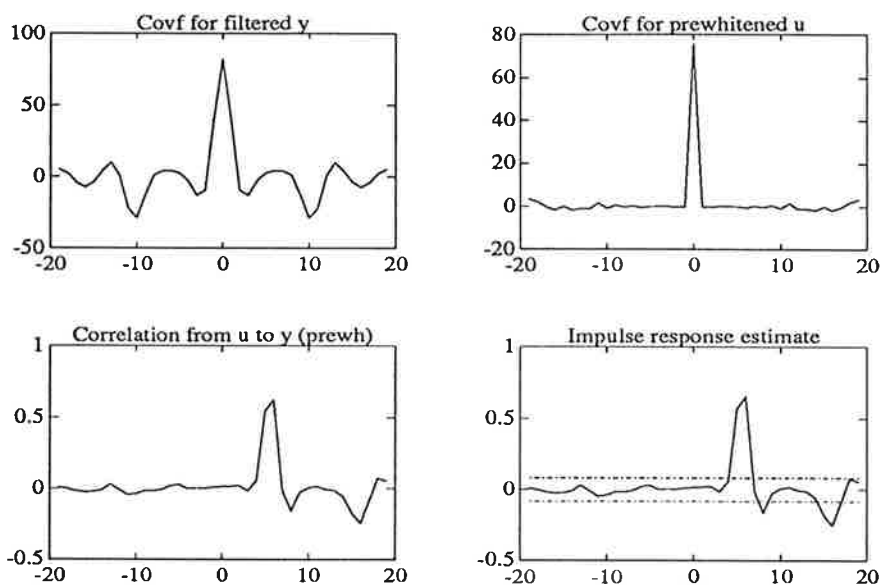
Som exempel på identifiering med mätdata från BISON har vi identifierat den dynamiska ångledningsmodellen för Barsebäck 2. Insignal är totala ångflödet genom HTV och MÖV. Utsignal är ångflödet från reaktorn. Hänsyn togs endast till ett rör av fyra. Detta kan påverka de dynamiska egenskaperna något eftersom rören ej är av samma längd. I övrigt utfördes BISON-körningen enligt specifikationen i bilaga 5 och metoderna i kapitel 5. För identifiering och validering har vi använt oss av de verktyg som finns att tillgå i MATLAB-makrot som beskrivs i avsnitt 4.2.

I figur 6.14 är totala ångflödet genom HTV och MÖV samt ångflödet från reaktorn plottade som funktion av tiden för 100% reaktoreffekt. Man urskiljer direkt en dödtid på ca 4 samplingsintervall, dvs 0.2 s.



Figur 6.14. Mätdata.

För att undersöka om det finns återkopplingar i systemet utförs korrelationsanalys av mätdata med MATLAB-kommandot *cra*. Resultatet (vid 100% effekt) återges i figur 6.15 och visar att ingen signifikant återkoppling förekommer eftersom  $u$  och  $y$  är okorrelerade för negativa tidsdifferenser. Detta är ett väntat resultat eftersom simuleringen utförts utan tryckregulator. Ur uppskattningen av impulssvaret och korrelationen mellan  $u$  och  $y$  framgår dödtiden tydligt.

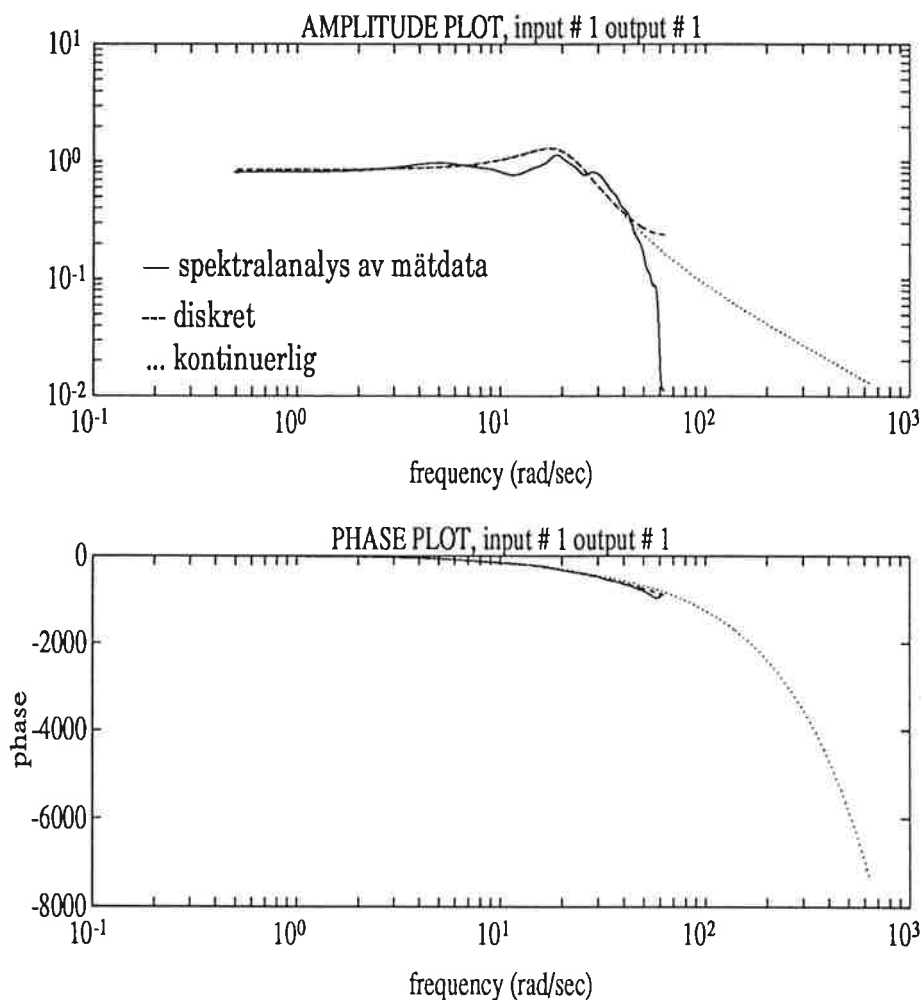


**Figur 6.15.** Korrelationsanalys.

Eftersom ångledningens dynamiska egenskaper antas variera med reaktoreffekten identifierar vi för 60%, 80% och 100% reaktoreffekt. Detta innebär att vi identifierar tre linjäriserade modeller kring flödena 900, 690 respektive 530 kg/s. I figur 6.16 återfinns Bodediagrammet för linjäriserade mätdata vid 100% effekt. Som synes uppstår resonans vid frekvensen 3 Hz.

Anledningen till att Bodediagrammet för mätdata plottas för linjäriserade värden är att excitationen är så liten (2%) att det för absoluta värden är svårt att urskilja något vettigt ur Bodediagrammet.

I samma figur syns även Bodediagrammet för modellen ARX [2 1 5]. Denna modell fungerade bra för samtliga effektfall (60, 80 och 100%). Eftersom vi med BISON-mätdata slipper mätbrus (bortsett från kvantiseringsfel) är det naturligt att en modell som inte modellerar bruset ger bra resultat. Modellering med ARMAX-modell av motsvarande gradtal och med låg ordning på brustermen gav samma resultat.



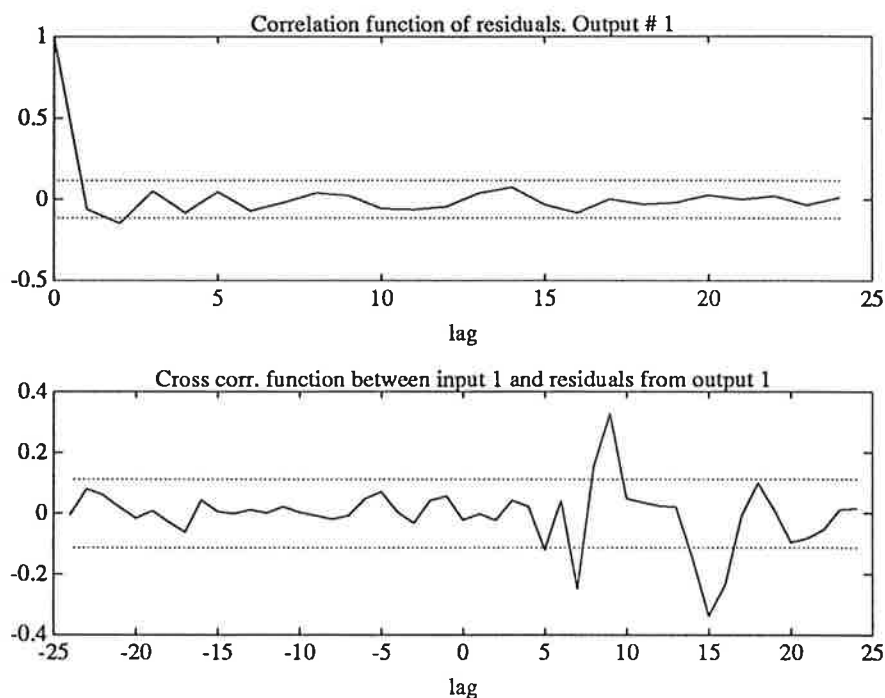
Figur 6.16. Bodediagram.

Överföringsfunktionerna i tabell 6.3 nedan är framtagna för linjäriserade mätdata med modellen ARX [2 1 5].

effekt	60%	80%	100%
NUM	10s + 428	9s+387	8s +341
DEN	s <sup>2</sup> +16s+390	s <sup>2</sup> +15s+393	s <sup>2</sup> +15s+400
Akaike's FPE	21	24	29
G(0)	1.1	1.0	0.85

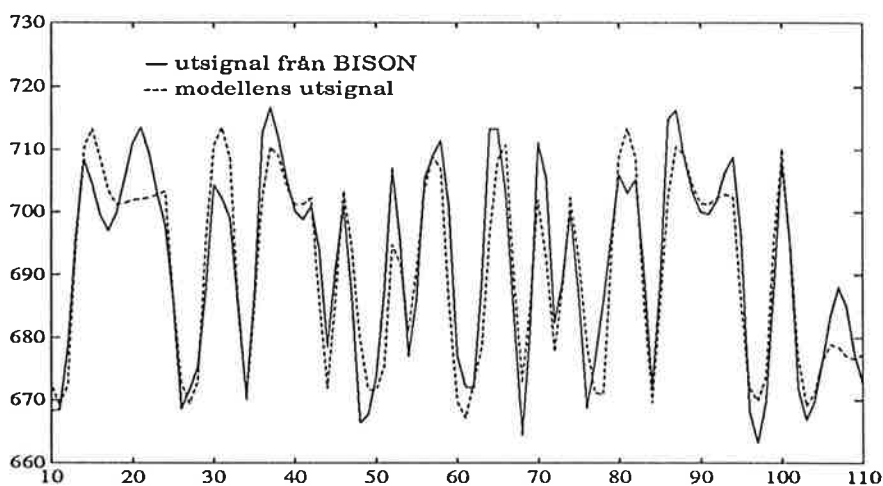
Tabell 6.3. ARX [2 1 5].

I figur 6.17 återfinns korrelationen mellan residualerna och korskorrelationen mellan insignal och residualerna för 100% effekt. Båda ligger huvudsakligen innanför konfidensintervallen.



**Figur 6.17.** Korrelationsanalys.

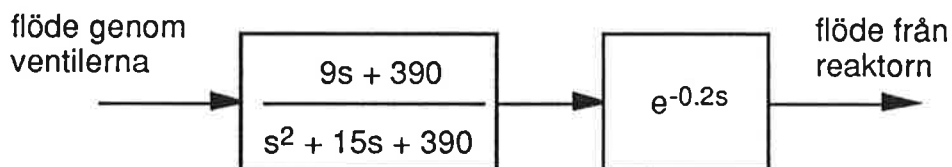
En simulering av systemet med insignalen från de sista 500 mätpunkterna (ej utnyttjade för identifiering) ger god överensstämmelse med motsvarande utsignal från BISON, vilket framgår av figur 6.18 (80% effekt).



**Figur 6.18.** Simulering av modellens utsignal plottad tillsammans med utsignal från BISON.

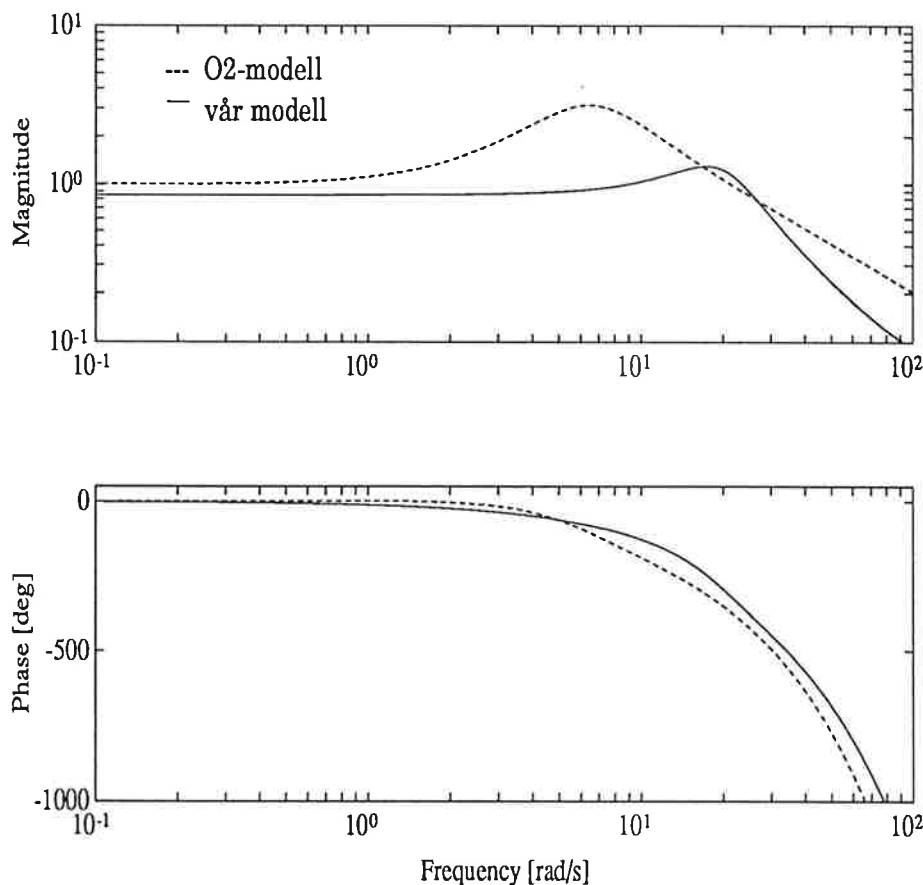
**Resultat**

Eftersom poler och nollställena i stort sammanfaller för våra modeller i samtliga tre effektfall antar vi en och samma linjära modell för den dynamiska ångledning i intervallet 60-100% reaktoreffekt.



**Figur 6.19.** Modell.

I figur 6.20 visas en jämförelse mellan vår modell och en modell från Oskarshamn 2 byggd på mätdata från verklig drift våren 1993 (NTB 93-016). Dödtiden i O2 uppskattades till 0.24 s. B2 och O2 är väldigt lika konstruktionsmässigt. Den skillnad som noteras i figuren beror därför snarast på att vi i vår modell endast tagit hänsyn till ett av de fyra rören. Modellen från O2 är av samma ordning som vår.



**Figur 6.20.** Bodediagram.



## 7 RESULTAT OCH FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE

Av uppgiftens natur följer att vi här inte kan presentera en lång rad resultat. Det egentliga resultatet är själva modelleringshandboken. I denna redogör vi inte bara för hur modelleringen kan ske utan delger även de lärdomar och slutsatser vi dragit under arbetets gång.

Vid modelleringen var den största svårigheten att dra gränsen för vad som egentligen behövde modelleras och vad som eventuellt kunde försummas. Exempel på svårbedömda fall är recirkulationsflöde, antal kompressibla volymer, pumpförluster mm. Här har vi inte kunnat ge några definitiva svar men vi har försökt belysa de tveksamheter som dykt upp.

Under identifieringsarbetet i MATLAB upptäckte vi snart att det var tröttsamt och tidskrävande att gång på gång anropa samma rutiner, döpa variabler osv. Vi framställde ett makro som sparade oss mycket tid och kan vara värt att uppgradera om ändringar krävs för att matcha framtida MATLAB-versioner.

Vid identifieringen blev vi också i praktiken varse några detaljer värda att tänka på. MATLAB-funktionen thd2thc, för överföring från diskret till kontinuerligt format på theta-matrisen, ger inte alltid tillförlitliga resultat. Vidare är det viktigt att analysera insignalens spektraltäthet innan slutsatser dras av identifieringsresultatet.

Vårt arbete med BISON visade att man med viss möda kan utföra BISON-simuleringar via telnet. En hel del hjälp från NTD krävs dock för att specificera indata till BISON. Det visade sig också att modellerna i BISON på matarvattensidan inte är mer komplexa än våra modeller. Här kan man alltså om så önskas kopiera vissa delmodeller direkt från BISON.

### Förslag till fortsatt arbete

På NTD pågår arbete som i framtiden kommer kunna underlätta modelleringen betydligt. Exempel på sådant arbete är framtagningen av anläggningsdatabaser för de olika verken och arbetet med att göra BISON mer användarvänligt.

I uppgiften ingick att i mån av tid implementera några delmodeller i Master som exempel. Detta har inte utförts då vi prioriterat slutförandet av de andra momenten. Vi bedömde inte att en implementering i Master skulle tillföra handboken särskilt mycket i proportion till den tid det skulle ta. Däremot kan det vara intressant att, i den mån det inte redan är känt, undersöka vilka cykeltider som är lämpliga för de olika delmodellerna.

## 8 SLUTORD

Avslutningsvis vill vi tacka hela SC för det trevliga bemötandet och för all hjälp. Speciellt tack till Mårten Åkesson, Håkan Svensson (NTD), Christer Ring, Elisabeth Gustafsson och Rolf Johansson (LTH). Vi har trivts utmärkt och har aldrig behövt känna oss rädda för att komma med frågor i tid och otid. Arbetet har underlättats betydligt av att vi hela tiden haft tillgång till två datorer vilket vi också tackar för.

Vi har upplevt det som mycket givande att under 15 veckor få insikt i hur det dagliga arbetet förlöper på en arbetsplats som SCB. Vår förståelse för hur en industrikoncern verkar i stort och smått har ökat betydligt. Vi kommer efter detta varmt rekommendera studiekamrater att göra examensarbete inom industrin i allmänhet, och på ABB Atom i synnerhet.

**REFERENSER**

- [1] RPA 88-41 Oskarshamn 2 - Modeller för effekt-, nivå- och tryckreglersystem.
- [2] KRE 85-131 Oskarshamn 1 - Beskrivning av processmodell för system 535.
- [3] RPA 88-68 Oskarshamn 1 - Modeller för effekt-, nivå- och tryckreglersystem.
- [4] KRA 84-547 Forsmark 3/Oskarshamn 3 - Datoriserad drifttagning - Teknisk specifikation av modeller.
- [5] RKE 93-040 Oskarshamn 2 - system 461 - systembeskrivning.
- [6] NTB 93-003 Oskarshamn 2 Turbine Controller- Identification and Verification of the Reactor Model in the Process Simulator.
- [7] RKE 93-036 Oskarshamn 2 - Turbinregulator - Funktionsbeskrivning av processmodell.
- [8] NTB 93-016 Oskarshamn 2 Turbine Controller- Identification and Verification of the Steamline Model in the Process Simulator.
- [9] RKE 91-179 Ringhals 1 Turbine-regulator - A simplified Steam Line Model.
- [10] RKE 90-290 Identification and Verification of the Steamline Model in Oskarshamn 1.
- [11] RKE 90-98 Oskarshamn 1 - turbinregulator - processmodell.
- [12] RKE 90-268 Oskarshamn 1 - Modelling Steam Lines.
- [13] RKE 91-270 Ringhals 1 - turbinregulator - processmodell.
- [14] Kärnkraftteknik, förkortad kurs, Kärnkraftsäkerhet och Utbildning AB
- [15] FSAR/413-4 Forsmark 1

- [16] RKE 92-171 Olkiluoto III (3800/2T) - System 537 Model for Online Simulation of Feed-water System.
- [17] SCB 94-1394 Beskrivning av en simulerings modell över matarvattensystem 415 i Ringhals 1.
- [18] VE 34/78 Mavareglering-modellarbete.
- [19] RKE 88-76 Oskarshamn 1-Beskrivning av process-simulator för system 537.
- [20] 0748/93 Ringhals 1 - Prov och analys av matarvattereglering, B Norén Vattenfall
- [21] System Modelling and Identification, Rolf Johansson
- [22] User's Guide, System Identification Toolbox, Lennart Ljung
- [23] Modellbygge och simulering, Lennart Ljung och Torkel Glad
- [24] RKE 91-145 System Identification Toolbox Identification Theory.
- [25] RKE 93-024 O2 Turbine Controller, BISON simulation for process model verification.
- [26] RKE 91-097 A Proposal to Simulation on BISON.

**REVISIONSFÖRTECKNING  
REVISION RECORD**

Rev nr Rev no	Datum Date	Avsnitt Section	Orsak Cause