
SKI:s perspektiv

Vilka forskningsmål bidrar detta projekt till?

De övergripande målen för SKI:s forskning är:

- att ge underlag för SKI:s tillsynsverksamhet
- att vidmakthålla och utveckla kompetens och forskarkapacitet inom områden av betydelse för kärnsäkerhetsarbetet samt
- att bidra direkt till säkerhetsarbetet i svensk kärnteknisk verksamhet.

Projektet har i huvudsak bidragit till forskningsmålet om att ge underlag för SKI:s tillsynsverksamhet i frågan om tryckreglersystemet vid Oskarshamn 3. Resultaten har visat att tycksvängningar uppstår i samband med de periodiska ventilproven där en ventil stängs i taget. I rapporten föreslås två möjligheter till förbättringar: Den ena åtgärden innebär en sänkning av förstärkningen hos tryckregulatorn. Den andra gäller en närmare undersökning av ångventilen 421VB1 som avviker dynamiskt från de övriga.

En slutsats från undersökningen är att detta kan vara generisk vilket i sin tur innebär att det kan förväntas uppstå även i andra BWR.

Projektinformation

SKI:s projekthandläggare:

Ninos Garis, Enheten för Reaktorteknik

Projektnummer:

14.5-001462-00228

Sammanfattning

Kort tid efter effektuppgången i samband med revisionsavställningen 1999 konstaterades larm för hög dämpkvot $DR > 0.8$ med stabilitetsmonitorn SIMON vid Oskarshamn 3. Händelsen visade att neutronflödessvängningen som orsakade stabilitetslarm skedde vid 0.2 Hz till skillnad från den förväntade frekvensen 0.5 Hz. En närmare undersökning visade att det var reglersystemet för reaktortryck som gav de påtvingade svängningarna av reaktordynamiken vid 0.2 Hz. Händelsen inträffade i samband med de periodiska ventilprov som utförs i anläggningen. Provet utförs vid reducerad reaktoreffekt $\sim 75\%$ genom att matarvattenflödet reduceras till (1200 kg/s).

Föreliggande undersökning har genomförts på uppdrag av SKI. Den baseras på en omfattande mängd mätdata som samlats in i samband med periodiska ventilprov men också under normaldrift vid olika effekter.

Resultaten visar att DR_t (Decay Ratio för tryckregleringen) var ~ 0.5 vid drift med 4 ångventiler. Att DR_t varit konstant vid drift med 4 ångventiler bedöms bero på att förstärkningen i återkopplingsloopen varit konstant oberoende av driftläget. Undersökningen visar också att $DR_t = 0.5 - 0.97$ vid drift med 3 ångventiler, det vill säga under ventilprovningen. Att DR_t förändrats bedöms bero på att förstärkningen i återkopplingsloopen varit högre och dessutom ökat med effekten på reaktorn. Det högsta DR_t värdet ($DR_t = 0.97$) erhöles när ventilprovet genomfördes vid reaktoreffekten 77 %.

Resultaten visar också att bäst stabilitet ($DR_t = 0.5$) erhålls vid ventilproven när ångventilen 421VB1 stängs. Detta framgår av samtliga ventilstängningsexperiment. Tolkningen är att ventilen 421VB1 bidrar med förhöjd förstärkning. Detta gäller åtminstone vid drift med 4 ångventiler.

Undersökningen omfattade också överföringsfunktionerna i tryckregulatorn. Denna visade att god överensstämmelse rådde mellan förväntad dynamik och den som identifierats med signalanalys. Tryckregulatorns förstärkning avvek dock tydligt från det förväntade värdet. Detta bedömdes dock möjligen bero på avvikande enhet.

Experiment med ventilprovning och datainsamling har också genomförts vid KSU med F3/O3 simulatorm. Ventilprov genomfördes vid 70, 75 och 80 % APRM-effekt. Resultaten avviker från de som erhöles i anläggningen. Lägst $DR_t = 0.19$, det vill säga bäst stabilitet, erhöles vid den högsta effekten, vilket är motsatt det som var att vänta.

Sammanfattningsvis visade resultaten från Oskarshamn 3 två möjligheter till att förbättra stabiliteten i tryckregleringen. Det ena förslaget innebär en sänkning av förstärkningen hos tryckregulatorn. Detta förväntas leda till lägre DR_t än nuvarande 0.5 vid drift med 4 ångventiler. På så vis skulle större stabilitetsmarginal erhållas för att klara ventilproven. Den andra åtgärden gäller en närmare undersökning av ångventilen 421VB1 som avviker dynamiskt från de övriga.

Innehållsförteckning

<u>Sammanfattning</u>	1
<u>1 Larm för DR >0.8 kort tid efter uppstart vid Oskarshamn 3</u>	5
<u>2 Mätsignaler och experiment som använts för undersökningen</u>	12
<u>3 Stabilitet i ett reglersystem</u>	16
<u>3.1 Evaluering av stabiliteten i ett reglersystem</u>	16
<u>3.2 Ziegler-Nichols metod för inställningen av en regulator</u>	17
<u>3.3 Reglering av olinjära system</u>	18
<u>4 Resultat med DR-beräkning</u>	20
<u>5 Undersökning av regulatorns komponenter</u>	25
<u>5.1 Ångledningsresonansfiltret</u>	25
<u>5.2 PI-regulatorn</u>	26
<u>5.3 Neutronframkopplingsfiltret</u>	26
<u>5.4 EHW-dynamiken</u>	26
<u>6 Förstärkningen hos överföringsfunktionerna i olika driftlägen</u>	30
<u>6.1 Förstärkningen med ångflödesbörvärdet som insignal och medel ventilläget som utsignal</u>	30
<u>6.2 Förstärkningen med ventilpositionen som insignal och ångledningstrycket som utsignal</u>	30
<u>6.3 Förstärkningen med ventilläge som insignal och reaktortryck som utsignal</u>	31
<u>6.4 Förstärkningen med ångflödesbörvärdet som insignal och reaktortrycket som utsignal</u>	31
<u>7 Regulatorns parametrar –förslag till åtgärd</u>	36
<u>7.1 Jämförelse med annan reaktor</u>	36
<u>7.2 Stegsvarstest experimenten med regulatorn</u>	37
<u>8 Ångventil 421VB1 – förslag till åtgärd</u>	41
<u>9 Ventilprovning vid KSU</u>	43
<u>10 Slutsatser</u>	48
<u>11 Referenser</u>	49

1 Larm för DR >0.8 kort tid efter uppstart vid Oskarshamn 3

Kort tid efter uppstart i samband med revisionsarbetet 1999 konstaterades larm från SIMON. Orsaken var att DR >0.8, se Figur 1.1. Händelsen visade att neutronflödessvängningen som orsakade stabilitetslarm skedde vid 0.2 Hz. Detta är märkligt eftersom en klassisk härdresonans förväntas ske vid 0.5 Hz. Händelsen inträffade i samband med de periodiska ventilprov som utförs i anläggningen. Fördenskull var effekten reducerad till 75 %.

En närmare undersökning genomförd av GSE visade att såväl neutronflödessignalerna som reaktortrycket svängde med 0.2 Hz. Den observerade oscillationen var alltså en så kallad anläggningsinstabilitet. Detta innebär att ett yttre reglersystem till reaktorn ger påtvingade svängningar av reaktordynamiken. Det är den bristande stabiliteten hos reglersystemet som försätter neutronflödet i svängning och som sedan i sin tur leder till ett DR>0.8. Anledningen till att SIMON ger larm för instabilitet är att svängningen ligger så nära härdresonansen vid 0.5 Hz.

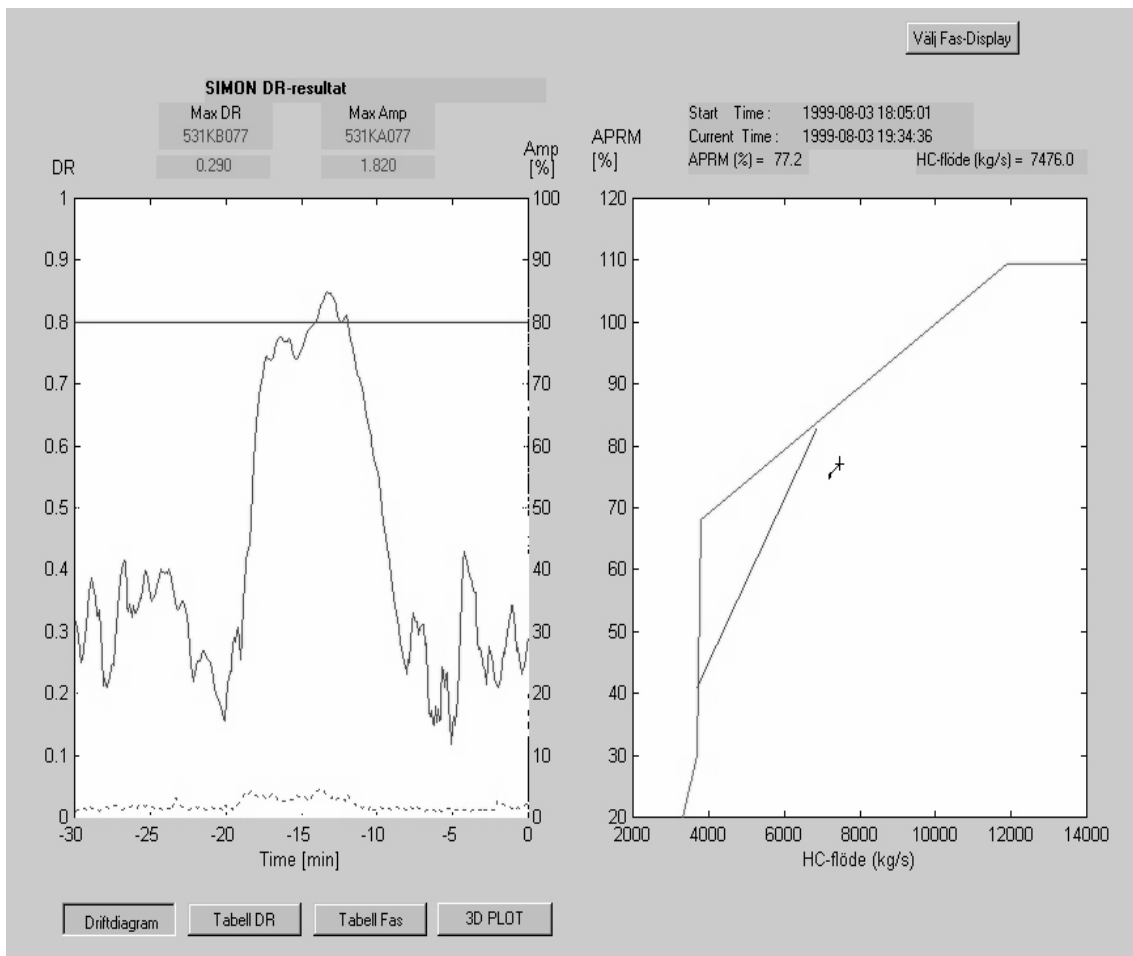
Tryckreglersystemet vid Oskarshamn 3 framgår principiellt av Figur 1.2. Fyra ångledningarna leder ånga till turbinen. Var och en av dessa är försedd med en ångventil som styrs av reglersystemets elektrohydrauliska omvandlare, benämnd med EHW i Figur 1.2. Ångventilerna får under normal effekt drift samma insignaler och därmed fördelas det totala ångflödet från reaktorn lika över de fyra ångledningarna. Regulatören har skillnaden mellan reaktorbovärdet (blågrön pil i figuren) och reaktortrycket som insignal där trycksignalen först passerat ett ångledningsresonans-kompensationsfilter som betecknas med "Filter" i Figur 1.2.

Målsättningen med tryckregleringen är att vidmakthålla konstant tryck i reaktorn. För att ytterligare närma sig detta mål har en så kallad framkoppling av APRM-signalen införts i reglersystemet, se blocket "Neutron FF Filter" i Figur 1.2. Denna signal påverkar regulatorns utsignal additivt. Idén med framkopplingen är att när en effektstörning (snabb ändring i APRM) inträffar så sker en snabb kompensation av ångflödet innan trycket ändras. På detta sätt motverkas den tryckändring som annars skulle infinna sig. Resultatet blir att reaktortrycket får mindre avvikelser från tryckbovärdet som är 6.9 MPa. Konstruktionen med framkoppling är en typisk ABB-Atom lösning som såvitt känt inte återfinns i andra BWR.

Inledningsvis nämndes att DR larm erhöles i samband med ångventilprovning. Provet innebär att vid reducerad effekt, i detta fall 75 %, så stängs en av ångventilerna medan de övriga 3 öppnas ytterligare för att bibehålla ursprungligt totalt ångflöde. Det var vid övergången från drift med 4 ångledningarna till 3 som oscillationerna uppstod och som sedan resulterade i larm. I Figur 1.3 presenteras ventilpositionssignalerna (421VA1, 421VA2, 421VB1 och 421VB2) som funktion av tiden. Den nedersta av kurvorna, 421VB2, är den ventil som stängs. Mellan 300 och 750 sekunder är ventilpositionen = 0. Under tiden som ventilen i fråga är stängd så sker svängningarna i ventilposition för de övriga tre ångventilerna. Av Figur 1.3 ser det ut som om ventil 421VB1 svänger med väsentligt mindre amplitud. Så är det inte, observera skillnaden i skala 0-60 % för 421VB2 jämfört med 48-56 % för 421VA2. Ventilposition-svängningarna leder till att reaktortryck och sedan också neutronflödet oscillerar med samma frekvens.

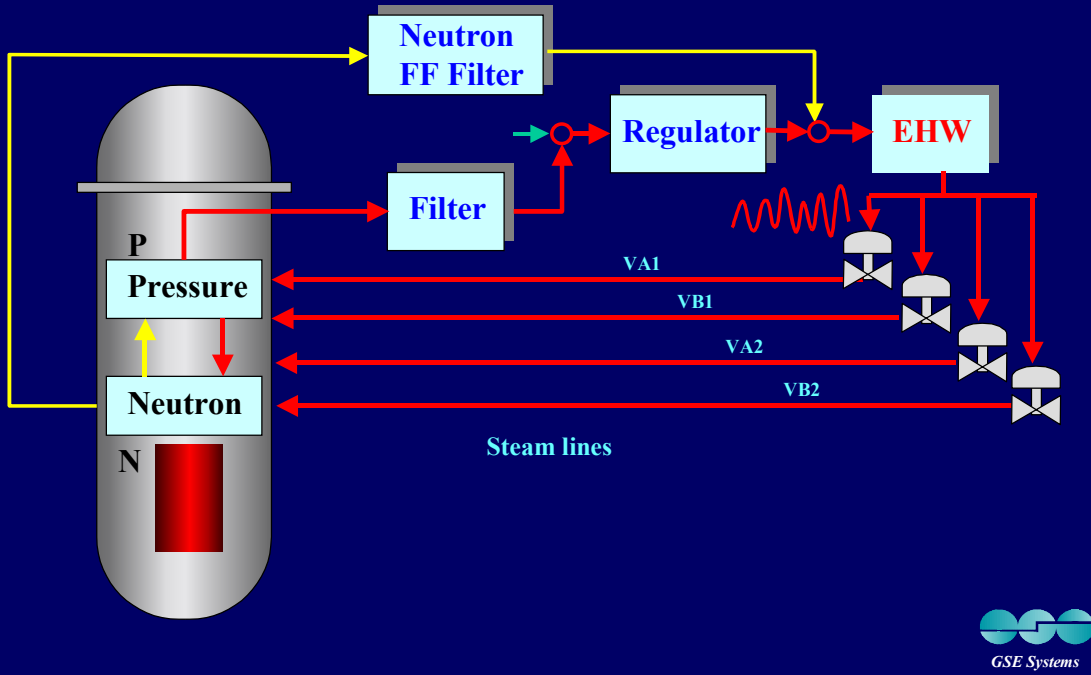
Orsaken till svängningarna bedöms vara bristande stabilitet hos reaktorns tryckreglersystem. I Figur 1.4 presenteras reaktortrycksignalen (211KA101) och APRM (531KA077) som funktion av tiden under högamplitudsvängningen. Av figuren framgår det att APRM svänger med 5 % topp-topp medan motsvarande siffra för reaktortrycket är 0.03 MPa. APSD för de bägge signalerna för tiden under högamplitudsvängningen presenteras i Figur 1.5. Tydliga toppar syns för de bägge spektra vid frekvensen 0.2 Hz.

Den bristande stabiliteten i tryckreglersystemet gör reaktorn känslig för transienter. En tryckstörning vid nämnda ventilprov kan förorsaka besvärande amplituder hos reaktortrycket och APRM. Trycksvängningarnas påverkan på neutronflödet är beroende på vid vilken frekvens som svängningen sker. Skulle trycksvängningen ske vid härdresonansfrekvensen så skulle väsentligt högre APRM-amplituder uppstå än de som presenteras här. I Figur 1.6 visas APSD för APRM under normaldrift samt under ventilprovet. Observera den tydliga resonansen vid 0.2 Hz under ventilprovet.

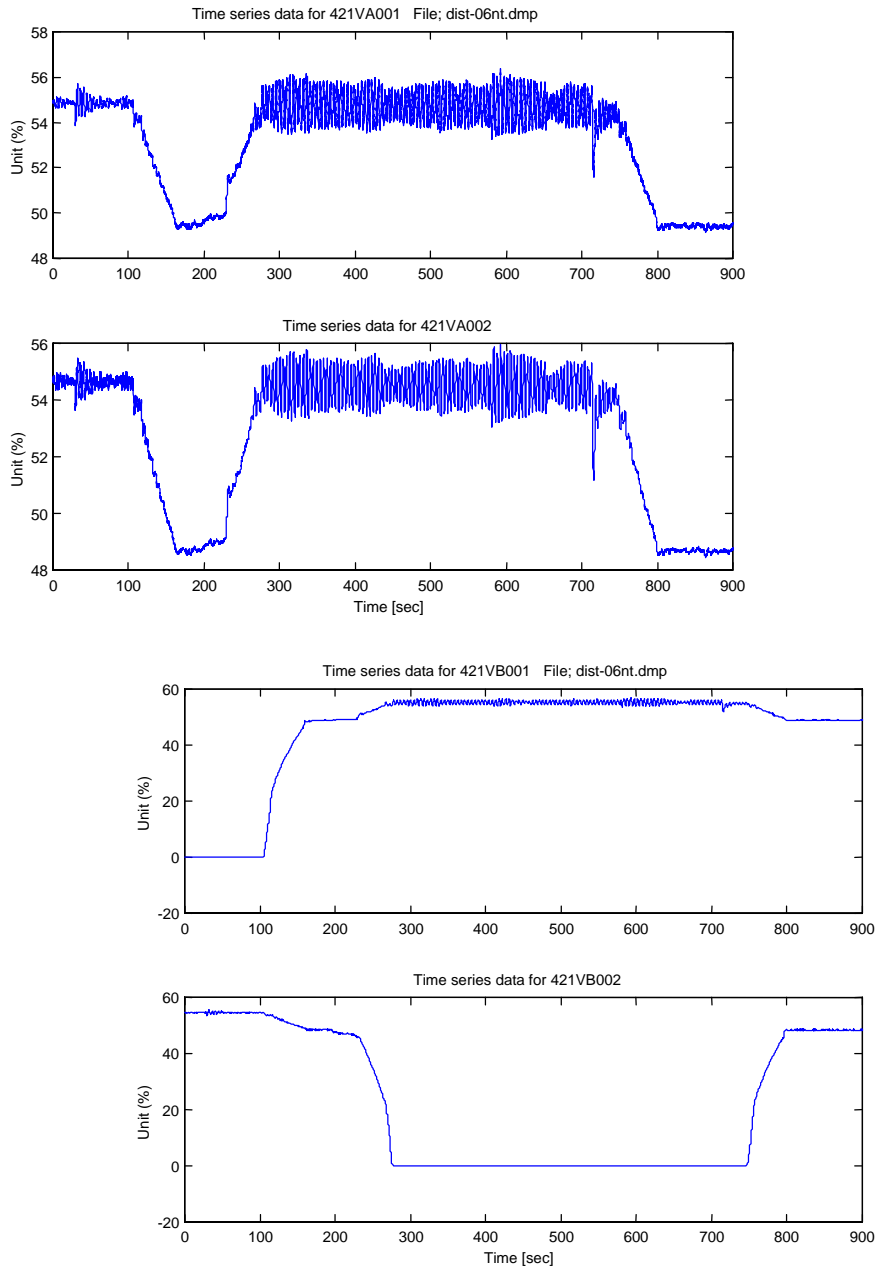


Figur 1.1 Trendkurva för DR samt driftdiagrammet med SIMON-O3 under ventilprovet som orsakade BWR-stabilitetslarm i Oskarshamn 3, den 3 augusti 1999.

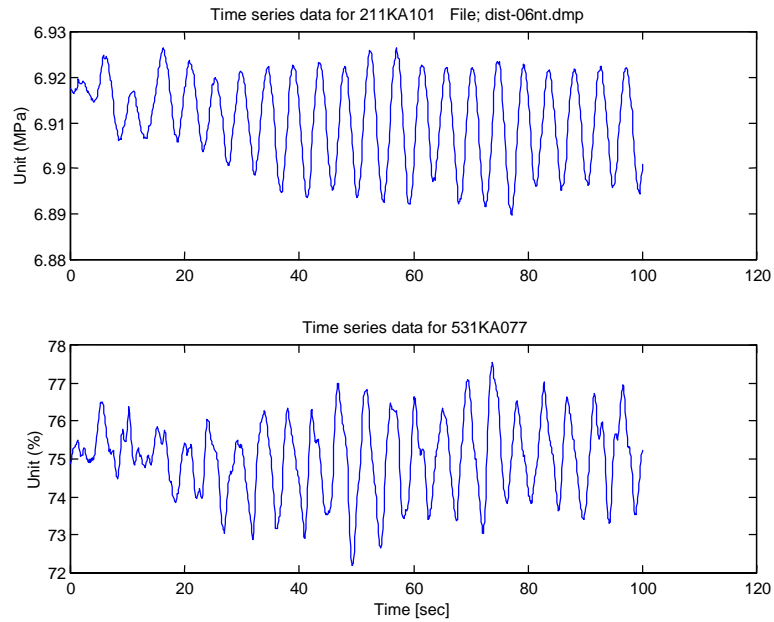
Power oscillation due to pressure disturbances in Oskarshamn 3



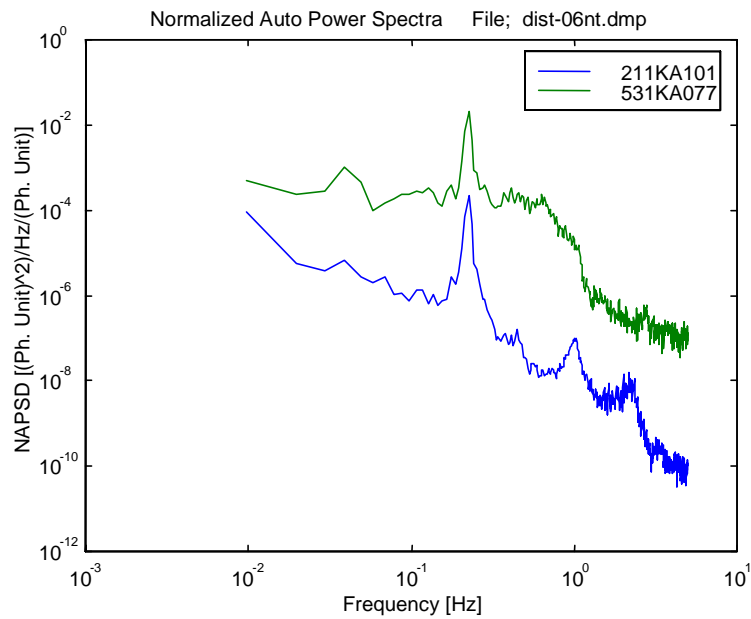
Figur 1.2 En förenklad beskrivning av tryckreglersystemet vid Oskarshamn 3.



Figur 1.3 Ventilpositionen för de 4 ångventilerna under ventilprovet. Observera högamplitudsvängningen när ventil 421VB2 stängs.

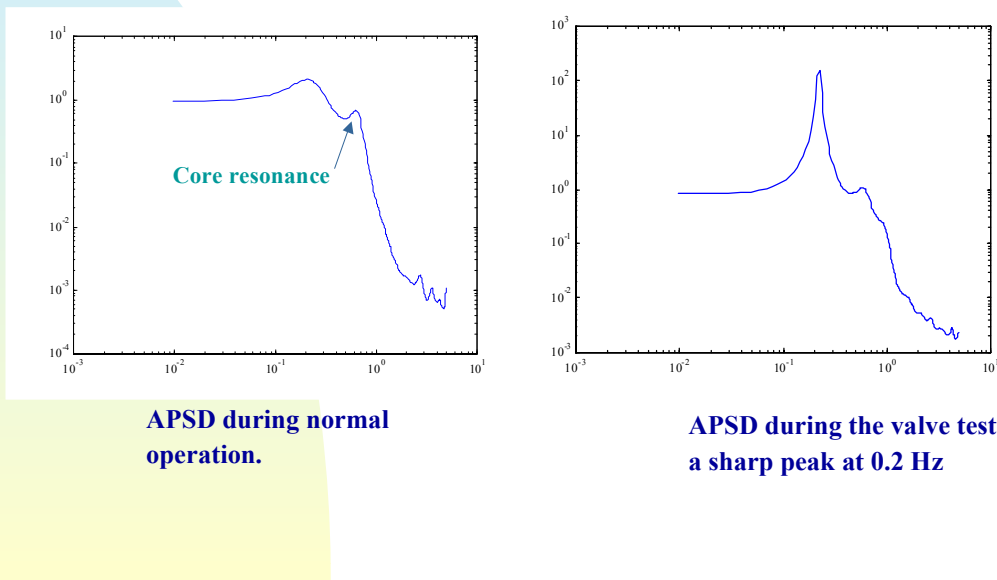


Figur 1.4 Reaktortryck(211KA101) och APRM-signalen(531KA077) under högamplitudsvängningen. Amplituden topp-topp är för APRM 5 % och för reaktortrycket 0.03 MPa.



Figur 1.5 APSD för reaktortryck(211K101) och APRM(531KA077) signalerna.

Power spectrum for APRM



Figur 1.6 APSD för APRM signalen under normaldrift samt under ventilprovet. Observera resonanstoppen vid 0.2 Hz som uppstår under ventilprovet.

2 Mät signaler och experiment som använts för undersökningen

En serie mätdata har insamlats vid Oskarshamn 3 med fokus på de tryckoscillationer som observerats. Mätningarna är genomgående samplade med 50 Hz och de omfattar i flertalet fall upp till 150 signaler. Av dessa syns såväl interna regulatorsignaler som processignaler. Dessa mätningar har genomförts med anläggningens mätdator. Därtill finns en uppsättning mätningar som erhållits via störskrivarfunktionen i SIMON. Dessa signaler är samplade med 10 Hz och omfattar inte några interna tryckregulatorsignaler. Antalet processignaler är också begränsat till 28, jämför med uppgifterna i Tabell 2.1. De experiment som genomförts och analyserats har följande benämning: M1, M2, M3 och M4.

M1 har registrerats 2000-02-25. Experimentet innehåller tre mätningar vid olika ventillägen (53 %, 55 % och 57 %) motsvarande APRM effekterna (85.7 %, 91.5 % och 95.4 %) under drift med 4 ångventiler. Syftet är att med dessa data kunna studera reglersystemets egenskaper med samtliga 4 ångventiler och vid olika ventil/effekt-lägen.

M2 har registrerats under ventilprovning. Signalerna samplades och ventilerna stängdes vid olika APRM-nivåer. Ventil 421VA1 stängdes vid APRM=71.5 %. Ventil 421VA2 stängdes vid APRM=72.2 %. Ventil 421VB1 stängdes vid 73.8 %. Ventil 421VB2 stängdes vid 75.8 %.

M3 har registrerats under ventilprovning vid APRM=73.7 %. Under denna registrering genomfördes alla 4 ventilstängningarna vid samma effekt.

M4 har slutligen registrerats med SIMON 1999-09-10. Det är SIMON's störskrivarfunktion som lagrat mätdata i samband med att $DR > 0.8$ för APRM.

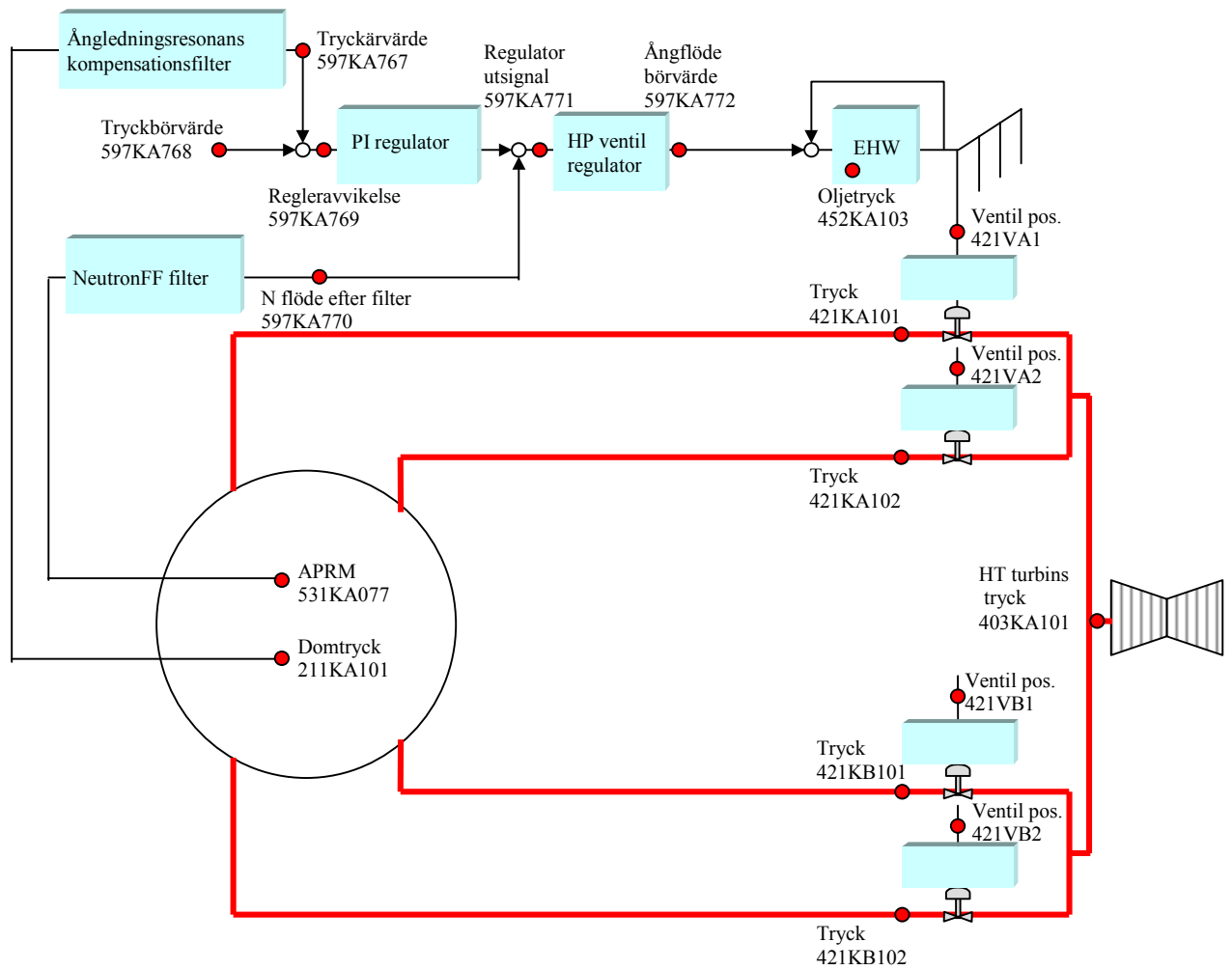
Mätdata från experimenten M1-M3 har samplats med 50 Hz medan motsvarande för M4 har samplats med 10 Hz. Experimenten M1 och M2 innehåller samtliga signaler som finns med i Figur 2.1 medan de övriga experimenten innehåller en delmängd av dem. En del förberedande signalbehandling har gjorts av mätsignalerna dit hör eliminering av spikar samt trender. Detta har gjorts för att förbättra möjligheten att nyttja signalanalys.

Tabell 2.1 visar summariskt processvärdena som beskriver tillståndet för tryckreglersystemet samt motsvarande driftläge. Vid Oskarshamn 3 mäts inte ångflödet därför använder vi matarvattenflödet som en grov ersättare för ångflödet i tabellen.

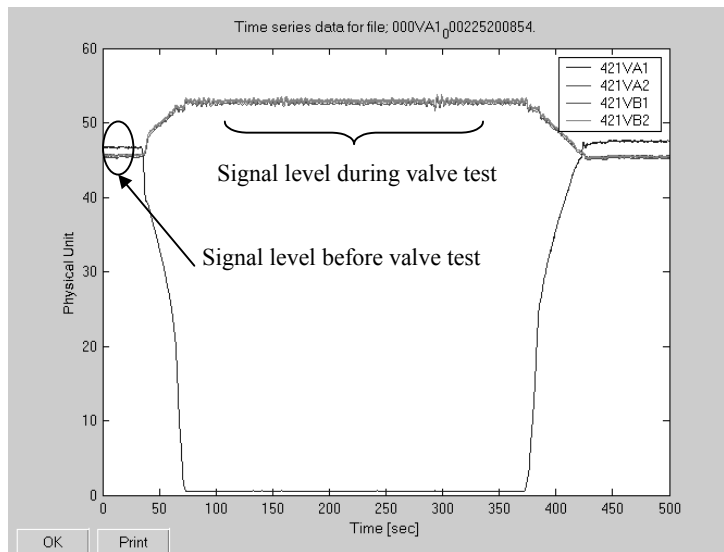
I den första testen (M1) samplades signalerna under drift med samtliga 4 ångventiler i drift. Medan de övriga testerna M2 – M4 genomfördes under ventilprovning det vill säga när ångventilerna stängdes för att sedan testa stängningen av tillhörande skalventiler. De siffervärden som ges i Tabell 2.1 har erhållits genom medelvärdesbildning av signaler före ventilprov samt under ventilprov, se Figur 2.2. Det bör påpekas att under ventilprovet när en ångventil stängs så öppnas de övriga tre ventilerna mer för att vidmakthålla oförändrat totalt ångflöde. Av denna anledning så är APRM och matarvattenflödet oförändrat före och under testen.

Tabell 2.1 Signal-medelvärden som beskriver reaktorn och regulatorn.

Mätning Nr.	Mät- tillstånd	APRM (%)	HC (kg/s)	421 VA1 (%)	421 VA2 (%)	421 VB1 (%)	421 VB2 (%)	Flöde (kg/s)	Antal CV
M1 CV test 2/25/00									
M1-1		85.7	9282.6	53.3	52.2	52.7	52.3	1346.2	4
M1-2		91.5	10382.9	55.3	54.5	55.1	54.6	1451.2	4
M1-3		95.4	11126.3	56.9	56.4	56.9	56.3	1522.2	4
M2 MSIV 2/25/00									
M2-1	före test	71.5	6135.2	46.9	45.6	45.3	45.5	1086.5	4
	VA1 stängd	71.4	6156.2	0	52.9	52.6	52.9	1088.8	3
M2-2	före test	72.2	6367.2	48.2	45.6	45.7	46	1103.3	4
	VA2 stängd	72	6363.6	54.5	0	52.5	52.9	1099.1	3
M2-3	före test	73.8	6706.5	49	47.1	46.3	46.9	1128.1	4
	VB1 stängd	73.6	6690.7	54.6	53.3	0	53.1	1128.9	3
M2-4	före test	75.8	7115.1	49.8	48.1	48.2	47.3	1165.2	4
	VB2 stängd	75.1	7073.6	55.1	53.8	54.4	0	1149.4	3
M3 MSIV 1/14/00									
M3-1	före test	73.7	6322.1	48.1	47.1	46.9	47.1	1137.5	4
	VA1 stängd	73.3	6225.3	0	53.5	53.4	53.5	1120.5	3
M3-2	före test	73.5	6320.3	48.5	46.3	46.5	46.7	1122.1	4
	VA2 stängd	73.2	6322.1	54.5	0	53.2	53.3	1120.2	3
M3-3	före test	73.3	6415.7	48.5	46.9	46.1	46.8	1122.1	4
	VB1 stängd	73.2	6381.8	54.2	53.2	0	53	1119.6	3
M3-4	före test	73.4	6448.3	48.3	46.7	46.9	46.1	1124.6	4
	VB2 stängd	73.1	6418.9	54	53	53.5	0	1116.9	3
M4 SIMON 9/10/99									
M4-1	före test	77.3	7223.5	50.3	49.4	49	49.4	-	4
	VA1 stängd	77.2	7229.4	0	55.4	55.2	55.5	-	3
M4-2	före test	76.7	7230.3	50.3	49.1	48.8	49.1	-	4
	VA2 stängd	76.5	7204.9	55.8	0	54.9	55.2	-	3
M4-3	före test	76.5	7217.1	50.2	49	48.2	49	-	4
	VB1 stängd	76.1	7210	55.3	54.7	0	54.8	-	3
M4-4	före test	76.1	7212.9	49.8	48.7	48.7	48.7	-	4
	VB2 stängd	75.6	7213.2	55.2	54.6	55.1	0	-	3



Figur 2.1 Blockschema som visar tryckreglersystemets konfiguration samt dess mätpunkter som markerats med rött i figuren.



Figur 2.2 Signalbeteendet före och under ventilprovningen. När ventilstängningsautomatiken stänger ventilen 421VA1 så ökar tryckreglersystemet de kvarstående 3 reglerade ventilöppningarna. Allt för att upprätthålla konstant tryck i reaktorn.

3 Stabilitet i ett reglersystem

I vårt exempel med regleringen av reaktortrycket är det enkelt att särskilja reglersystemets olika delar. Där finns PI-regulatorn, EHW, Ventiler, reaktorns överföringsfunktion från ångflöde till ångtryck. Dessutom återges två återkopplingar en via reaktortrycket och ångresonansfiltret och den andra via neutronflödesframkopplingen. Den bristande stabilitet som framställs i denna rapport har sitt ursprung i tryckåterkopplingen. I Figur 3.1 presenteras två regulatorsignaler 597KA770 som är neutronflödesframkopplingssignalen (liten amplitud) samt 597KA771 som är en summa av regulatorns utsignal och framkopplingssignalen (stor amplitud). Se Figur 2.1. Tolkningen är att oscillationen som visas i figuren väsentligen underhålls via tryckåterkopplingen. Och fördenskull kommer beskrivningen enbart att vara koncentrerad på tryckåterkopplingen.

PI-regulatorn i Figur 2.1 har till uppgift att generera en utsignal som minimerar avvikelserna mellan tryckbörvärdet och tryckärvärdet. För att klara uppgiften rent statistiskt har regulatorn en integrerande funktion. Detta innebär att ett konstant reglerfel kommer att leda till en ökande utsignal hos regulatorn till dess att avvikelserna mellan börvärdet och ärvärdet eliminerats.

3.1 Evaluering av stabiliteten i ett reglersystem

Stabiliteten kan evalueras med flera olika metoder.

Metod I

Den klassiska metoden är att använda ett Bodediagram. Det öppna systemets överföringsfunktion beräknas i detta fall och dess förstärkningskurva och fas-kurva ritas som funktion av frekvensen i ett så kallat Bodediagram. Det återkopplade systemet kommer nu att bli instabilt om faskurvan vid förstärkningen=1 har en faskvifning= -180 grader. Den frekvens som detta sker vid blir oscillationsfrekvensen. Ett stabilt återkopplat system erhålls om faskurvan vid förstärkningen=1 har en marginal kvar till -180 grader. Denna marginal kallas fasmarginalen. Lämpliga värden för fasmarginalen är 30 – 60 grader. Nackdelen med denna metod är att den kräver god detaljkunskap om de ingående överföringsfunktionerna i reglersystemet.

Metod II

En metod som också kan användas är stegsvarmetoden. I detta fall ändras börvärdet till tryckregulatorn stegformat vid samtidig registrering av tryckärvärdet. Stabiliteten bedöms i detta fall av tryckärvärdets form. I det fall när stegsvaret är oscillerande är det lämpligt att svängningarna är dämpade så att väsentligen enbart två överslängar förekommer. Skulle oscillationerna efter en stegstörning fortgå odämpade eller med växande amplitud föreligger en instabilitet. Nackdelen med denna metod är att den kräver ett experiment med reglersystemet.

Metod III

En annan metod som också kan nyttjas är signalanalys. I detta fall förutsätts att det finns processtörningar i det återkopplade systemet. Dessa störningar blir insignal till det

återkopplade systemet. Genom att sampla ärvärdet, i detta fall trycksignalen, och anpassa en modell med hjälp av processidentifiering kan dynamiken evalueras. Impulsstörning av modellen medger att ett stabilitetsmått DR_t (Decay Ratio för trycksignalen) kan beräknas. För ett reglersystem bör $DR_t < 0.8$ i annat fall erhålls dålig dämpning av störningar i regleringen. Detta är således samma teknik som används i stabilitetsmonitorn SIMON men i detta fall tillämpat på ett återkopplat reglersystem i stället för härdynamiken med voidåterkopplingen. I denna rapport benämns den vanliga härdstabiliteten med DR_A (Decay Ratio för APRM).

I föreliggande rapport kommer signalanalysmetoden att användas för evaluering av stabiliteten hos tryckreglersystemet. Måttet DR_t kommer att nyttjas och i detta fall avser det en egenskap hos tryckregleringen, medan DR_A avser härdens dynamik.

Med hjälp av Bodediagram kommer också stabiliteten hos det återkopplade tryckreglersystemet att beskrivas i denna rapport.

Resultaten som erhållits från KSU med simulering av tryckregleringen kommer att studeras med stegsvarsmetoden.

3.2 Ziegler-Nichols metod för inställningen av en regulator

Ziegler-Nichols metod används som en tumregel för inställningen av en regulator. Med dess hjälp kan en P-, PI- eller PID-regulators parametrar väljas. De parametrar som avses är Förstärkningen K, Integrationstiden T_i samt derivationstiden T_d . Metodiken har följande beskrivning:

Ställ in PID-regulatorn så att den enbart har förstärkning, det vill säga som en ren P-regulator med låg förstärkning. Detta innebär att $T_d=0$ och $T_i = \infty$. Öka därefter förstärkningen till dess att självsvängning erhålls. Notera den förstärkning $K (=K_o)$ vid vilken detta inträffar. Notera också vid vilken periodtid T_o som svängningen sker. Ställ sedan in regulator-parametrarna enligt schemat i Tabell 3.1.

Tabell 3.1 Parameterinställning för en regulator enligt Ziegler-Nichols metod.

Regulatortyp	K	T_i	T_d
P-regulator	0.5 K_o	-	-
PI-regulator	0.45 K_o	0.85 T_o	-
PID-regulator	0.6 K_o	0.5 T_o	0.125 T_o

Eftersom tryckregulatorn vid Oskarshamn 3 är en PI-regulator så är det rad 2 i tabellen som gäller för detta fall.

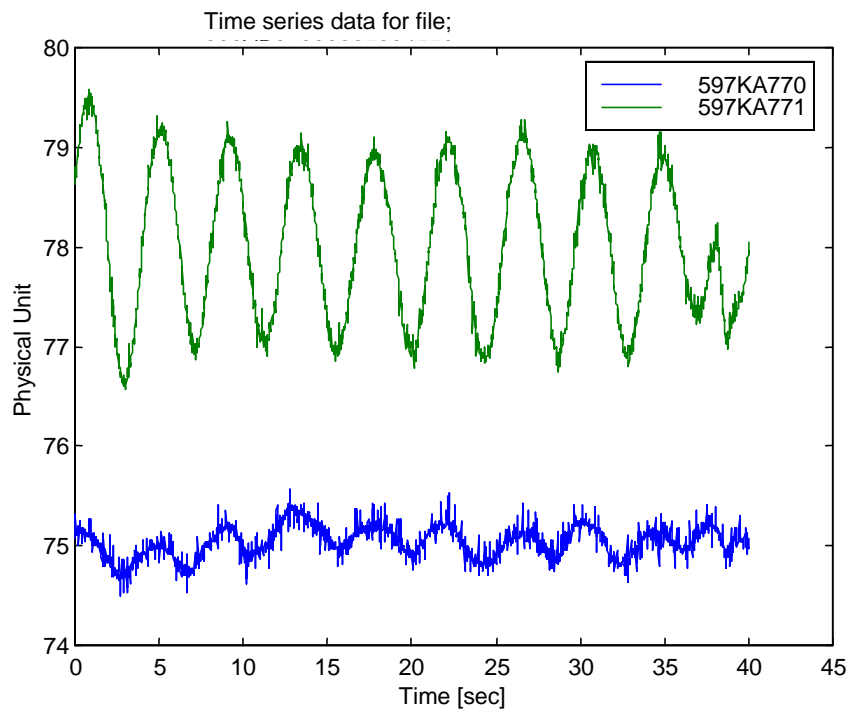
Längre fram i rapporten kommer valet av parametrar i tryckregulatorn att kommenteras och jämföras med de rekommendationer som Ziegler-Nichols tumregler anvisar. Det finns mer att läsa om ingenjörsmässig regulatorinställning i Referens 1.

3.3 Reglering av olinjära system

Ett linjärt system är enkelt att reglera eftersom dess dynamik är konstant och oföränderligt oavsett driftläge eller typ av störning. För ett linjärt system kan en regulator ställas in, till exempel enligt den tumregel som presenterats i föregående kapitel. Regulatorns parametrar väljs så att de passar processens dynamik. Och de dynamiska egenskaperna kommer sedan att vara konstanta. Inga instabiliteter eller avvikande dynamik är att vänta i ett sådant system.

För ett olinjärt system är det annorlunda. Där kan stabilitet råda i ett driftområde, men inte i ett annat på grund av att processens dynamik förändras. För att hantera en olinjär process av denna typ kan till exempel en adaptiv regulator användas. Detta innebär att regulatorn använder olika parametrar i olika driftlägen för att det ska bli passande inställning av regulatorparametrarna till den föränderliga processen. Av säkerhetsskäl används såvitt känt inte adaptiva regulatorer i reaktortekniska tillämpningar av den anledningen att de är komplicerade eller till och med omöjliga att kvalitetsgranska.

Tryckregulatorn i Oskarshamn 3 fungerar utan oscillationer med hög amplitud så länge som alla 4 ångventilerna är i funktion. När en av ångventilerna stängs så uppträder oscillationer med hög amplitud orsakade av en förändring i processens dynamik. Regulatorns parametrar stämmer då inte längre överens med processen med dålig stabilitet som följd. Tryckreglersystemet är således ett exempel på ett olinjärt system.



Figur 3.1 Regulatorsignalerna 597KA770 och 597KA771 som funktion av tiden under högamplitudsvängningen. Observera att neutronflödesamplituden är ringa i jämförelse med bidraget från tryckåterkopplingen. Tolkningen är att det är tryckåterkopplingen som ger orsak till den bristande stabiliteten.

4 Resultat med DR-beräkning

Med hjälp av signalanalys har tryckreglersystemets stabilitet undersökts. Den metod som tillämpats är den som har beteckningen Metod III i Kapitel 3. Tryckreglersystemet betraktas således som ett återkopplat system med vitt brus som insignal. Genom att anpassa en UAR-modell (Univariate Auto Regressive) till den samplade reaktortrycksignalen kan reglersystemets dynamik identifieras. Med hjälp av den identifierade modellen kan sedan reglersystemets DR_t beräknas genom att modellen utsätts för en impulsstörning. På samma sätt som för härddynamiken bedöms stabilitetsgränsen ligga vid $DR_t = 0.8$. Vi vill gärna påpeka att detta värde kan anses högt i samband med reglerteknisk design och att ofta är kraven på dämpning i ett reglersystem mycket högre. Detta innebär då att DR_t ska vara betydligt lägre än 0.8.

För att vidga resultaten från undersökningen beräknas också DR_A samt de oscillationsfrekvenser som observeras för såväl tryck som neutronflöde. Resultaten finns listade i Tabell 4.1. Här framgår också aktuellt APRM samt vilka ångventilöppningar som förelåg under de olika proven. Kolumnen längst till höger innehåller uppgift om larm förelåg under provet. Denna bedömning är kopplad till stabilitetsgränsen $DR_t = 0.8$.

För proven M1 har mätningarna genomförts 2000-02-25 vid tre olika effekter i syfte att täcka tre öppningsvinklar hos ångventilerna. Dessa är 53 %, 55 % och 57 %. Mätningarna sker i detta fall med 4 ångventiler. Tabell 4.1 visar till exempel att 421VA1 är 53.3 %, 55.3 % och 56.9 % för respektive prov M1-1, M1-2 och M1-3.

DR_t för tryckregleringen visar att systemet är stabilt med ett DR_t som är 0.525, 0.595 och 0.524. I princip är stabiliteten för tryckreglersystemet med 4 ventiler i drift oberoende av driftläget inom det område som undersökts. Motsvarande DR_A -värden för APRM är enligt Tabell 4.1 betydligt lägre 0.33, 0.39 och 0.23. Att dessa värden är lägre är fullt naturligt eftersom det är tryckoscillationerna som är motorn i de svängningar som vi kommer att iakttaga.

För proven M1 kan dessutom konstateras att resonansfrekvensen för såväl APRM som reaktortryck stämmer väl överens med varandra. De är omkring 0.24 Hz och de anges med Pkf (Peak frequency) i Tabellen 4.1.

Under proven M2 har mätningarna genomförts 2000-02-25 under ventilstängningen vid olika APRM-effekter, se Tabell 4.1. Under prov M2-1 det vill säga när ventil 421VA1 stängs är APRM=71.4 %. Under prov M2-2 är APRM=72 %. Under M2-3 är APRM=73.6 % och under prov M2-4 är slutligen APRM=75.1 %. Detta experiment är intressant eftersom APRM är en parameter under provet. DR_t för tryckregleringen framgår av Tabell 4.1. DR_t varierar från 0.54, 0.71, 0.51 och 0.83 från den lägsta till den högsta APRM effekten. Det är uppenbart att tryckreglering har sämst stabilitet det vill säga $DR_t = 0.83$ är högst för provet som görs vid högst APRM=75.1 %. Provet M2 genomförs vid betydligt lägre effekt än M1 och ändå blir ventilöppningen ungefär densamma 52.6-55.1 %. Orsaken är att provet M2 görs med en ventil stängd. Detta innebär att de övriga 3 ventilerna måste öppna mer för att ge samma ångflöde som vid drift med 4 ångventiler.

$DR_A = 0.75$ under provet M2-4 och detta är det högsta värdet. Provet M2 gav således inte larm med SIMON ändå är tryckregleringens stabilitet alarmerande ty $DR_t = 0.83$.

Provet M3 har genomförts 2000-01-14 under ventilstängning vid $APRM = 73.3 \%$, se Tabell 4.1. Även detta prov ger oscillationer med frekvensen 0.23-0.24 Hz. DR_t varierar under provet. Vi observerar 0.59, 0.81, 0.50 och 0.54 vid stängning av respektive ventil 421VA1, 421VA2, 421VB1 och 421VB2. Det högsta DR_t -värdet = 0.81 för trycksignalen uppnås följaktligen vid stängningen av ventil 421VA2, medan det lägsta DR_t -värdet = 0.50 uppnås vid stängningen av ventil 421VB1.

Redan nu står det klart att under ventilstängningarna blir DR_t lägst vid stängningen av ventilen 421VB1. Detta innebär att ventilen 421VB1, när den är i drift, bidrar mest till de förhöjda DR_t -värdena för trycksignalen. Observera att samma förhållande gäller för mätning M2. I den mätningen har M2-3 det lägsta DR_t -värdet och detta uppstår när ventilen 421VB1 stängs.

Provet M4 utgörs av data som automatiskt samlats in med SIMON i samband med larm för högt $DR_A > 0.8$ för neutronflödessignalerna. De nyttjade data har samlats in 1999-10-09. Denna mätning är den tydligast instabila. DR_t är 0.98, 0.98, 0.51 och 0.95. Motsvarande DR_A - värden är också över larmgränsen utom för stängningen av ventilen 421VB1. Det väsentliga som skiljer mätserierna M2 och M3 från M4 är APRM effekten. M4 sker vid $APRM = 75.6 - 77.2 \%$.

I Tabell 4.2 återfinns en sammanställning av experimenten med DR_t vid respektive ventilstängning. Dessutom har ett medelvärde för DR_t beräknats i tabellens rad längst ner. Medelvärdena för DR_t visar entydigt det lägsta värdet när 421VB1 är stängd medan det högsta DR_t värdet konstateras när 421VA2 är stängd. Slutsatsen av detta blir att ventilen 421VB1 försämrar stabiliteten. På samma sätt kan man säga att driften med 421VA2 förbättrar stabiliteten.

I Figur 4.1 presenteras DR_t och DR_A från Tabell 4.1 som funktion av APRM. I figuren används symbolen cirkel = drift med 4 ventiler. Symbolen fyrkant = drift med tre ventiler när 421VB1 är stängd. Observera att detta är det snällaste fallet. Symbolen stjärna = drift med 3 ventiler för de övriga experimenten. För samtliga såväl symboler som linjer i Figur 4.1 gäller att röd betyder DR_t och blå DR_A .

Den röda linjen i Figur 4.1 har anpassats till DR_t -värden under drift med tre ventiler varvid resultaten från ventilstängningen 421VB1 har exkluderats. Den röda linjen visar en brant stigning för DR_t med ökande APRM. Den når $DR = 1$ vid $APRM = 77 \%$. Observera att DR_t -linjen ligger över motsvarande DR_A -linje och att de bägge linjerna skär varandra vid Decay Ratio = 1.

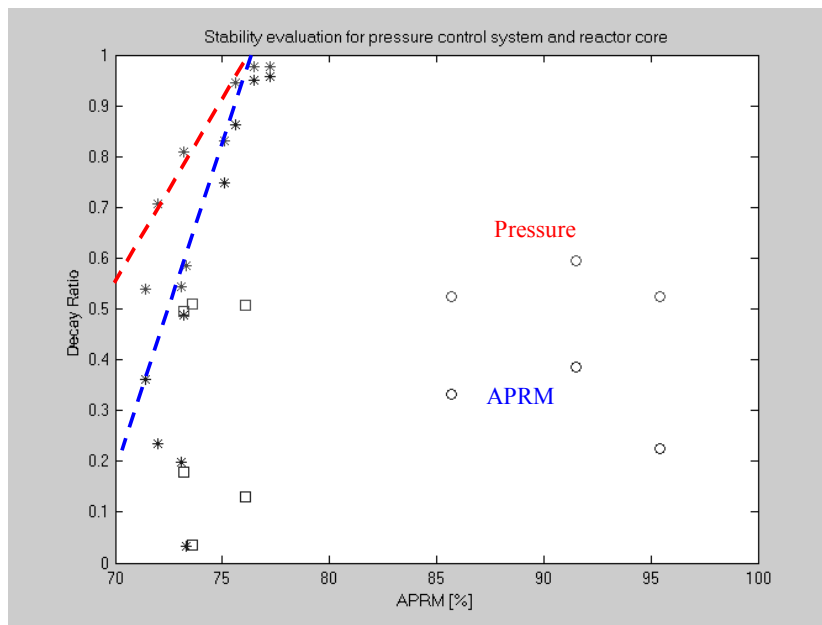
I Figur 4.2 visas samma information som i Figur 4.1. Den enda skillnaden är att DR_t och DR_A visas som funktion av ventilläget. Det nya som framgår av denna figur är att Decay Ratio=1 uppnås vid vinkelläget = 55.5 %.

Tabell 4.1 Sammanställning av resultaten från signalanalysen

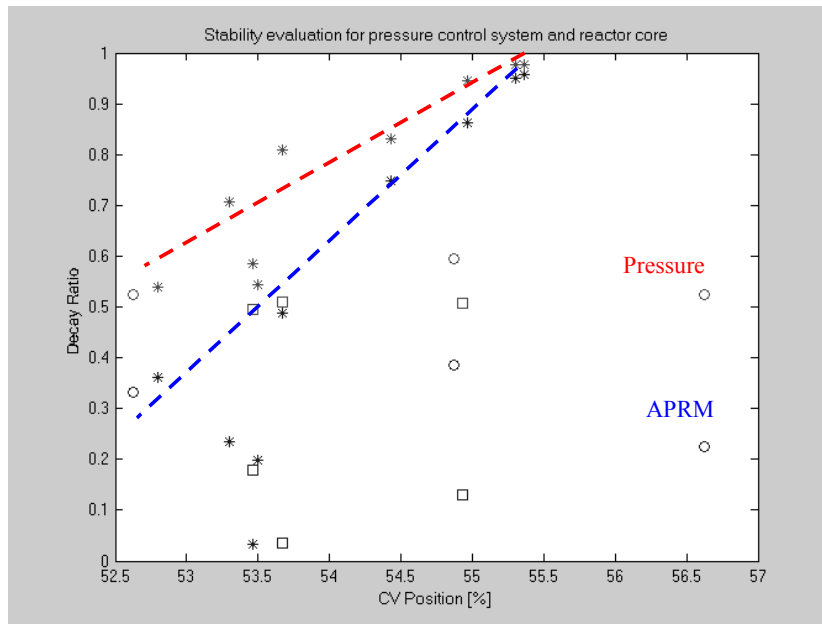
Mät-	Mät-	APRM	APRM	APRM	Tryck	Tryck	421	421	421	421	Stab-
Nr.	tillstånd	DC (%)	DR _A	Pkf (Hz)	DR _t	Pkf (Hz)	VA1 (%)	VA2 (%)	VB1 (%)	VB2 (%)	ilitet
M1 CV-test	2/25/00										
M1-1		85.7	0.333	0.26	0.525	0.25	53.3	52.2	52.7	52.3	Stabil
M1-2		91.5	0.386	0.255	0.595	0.239	55.3	54.5	55.1	54.6	Stabil
M1-3		95.4	0.226	0.243	0.524	0.221	56.9	56.4	56.9	56.3	Stabil
M2 MSIV	2/25/00										
M2-1	VA1 stängd	71.4	0.361	0.268	0.539	0.251	0	52.9	52.6	52.9	Stabil
M2-2	VA2 stängd	72	0.236	0.248	0.706	0.24	54.5	0	52.5	52.9	Stabil
M2-3	VB1 stängd	73.6	0.036	0.249	0.51	0.243	54.6	53.3	0	53.1	Stabil
M2-4	VB2 stängd	75.1	0.749	0.239	0.832	0.233	55.1	53.8	54.4	0	Larm
M3 MSIV	1/14/00										
M3-1	VA1 stängd	73.3	0.033	0.215	0.585	0.237	0	53.5	53.4	53.5	Stabil
M3-2	VA2 stängd	73.2	0.487	0.237	0.809	0.237	54.5	0	53.2	53.3	Larm
M3-3	VB1 stängd	73.2	0.178	0.252	0.495	0.235	54.2	53.2	0	53	Stabil
M3-4	VB2 stängd	73.1	0.199	0.22	0.544	0.237	54	53	53.5	0	Stabil
M4 SIMON	9/10/99										
M4-1	VA1 stängd	77.2	0.957	0.224	0.977	0.224	0	55.4	55.2	55.5	Larm
M4-2	VA2 stängd	76.5	0.951	0.231	0.976	0.232	55.8	0	54.9	55.2	Larm
M4-3	VB1 stängd	76.1	0.129	0.207	0.507	0.229	55.3	54.7	0	54.8	Stabil
M4-4	VB2 stängd	75.6	0.863	0.231	0.945	0.229	55.2	54.6	55.1	0	Larm

Tabell 4.2 DR_t för tryckregleringen. Medelvärden för respektive ventil för tre mätningar. Resultatet indikerar att stabiliteten är sämst när 421VA2 är stängd och bäst när 421VB1 är stängd.

Experiment	421VA1 closed	421VA2 closed	421VB1 closed	421VB2 closed
M2	$DR_t = 0.539$	$DR_t = 0.706$	$DR_t = 0.510$	$DR_t = 0.832$
M3	$DR_t = 0.585$	$DR_t = 0.809$	$DR_t = 0.495$	$DR_t = 0.544$
M4	$DR_t = 0.977$	$DR_t = 0.976$	$DR_t = 0.507$	$DR_t = 0.945$
Mean	$DR_t = 0.70$	$DR_t = 0.83$	$DR_t = 0.50$	$DR_t = 0.77$



Figur 4.1 DR_t för tryckregleringen röd-symbol och DR_A för APRM blå-symbol. Symbolen cirkel = drift med 4-ventiler. Symbolen fyrkant=drift med 3-ventiler när 421VB1 är stängd. Detta är det snällaste fallet. Symbolen stjärna= drift med 3-ventiler för de övriga experimenten. Det är uppenbart att tryckregleringen passerar stabilitetsgränsen vid APRM=76 %. Observera att DR_t -linjen ligger högre än DR_A -linjen.



Figur 4.2 DR_t för tryckregleringen röd-symbol och DR_A för APRM blå-symbol. Symbolen cirkel = drift med 4-ventiler. Symbolen fyrkant=drift med 3-ventiler när 421VB1 är stängd vilket är det stabilaste fallet. Symbolen stjärna= drift med 3-ventiler för de övriga experimenten. Det är uppenbart att tryckregleringen passerar stabilitetsgränsen vid ventilpositionen=55.3%. Observera att DR_t -linjen ligger högre än DR_A -linjen.

5 Undersökning av regulatorns komponenter

I detta kapitel kommer de överföringsfunktioner som ingår i regulatorn att identifieras. Den dynamik som finns hos insignalen och utsignalen nyttjas för bestämning av överföringsfunktionens parametrar. Det kommer också att bli jämförelse med de funktionsvärden som förväntas.

De överföringsfunktioner i tryckregleringen som kommer att undersökas i detta kapitel är:

- Ångledningsresonansfiltret med 211KA101 som insignal och 597KA767 som utsignal.
- PI-regulatorn med 597KA769 som insignal och (597KA771-597KA770) som utsignal.
- Neutronframkopplingsfiltret med 531KA077 som insignal och 597KA770 som utsignal.
- EHW-systemet med 597KA772 som insignal och 421VA1, 421VA2... som utsignaler.

5.1 Ångledningsresonansfiltret

I Figur 2.1 presenteras ett blockschema för regulatorn. Där framgår det att tryckärvärdet passerar ett filter innan det påverkar tryckregulatorn. Filtret benämns ångledningsresonansfilter. Filtret har något förenklat 211KA101 som insignal och 597KA767 som utsignal. Enligt uppgift har filtret överföringsfunktionen $G(s) = (1 + 0.21s) / (0.1s^2 + 0.44s + 1)$.

Genom att identifiera en modell till insignalen och utsignalen samt stegsvarstesta modellen kan överföringsfunktionen undersökas och dessutom jämföras med den teoretiska överföringsfunktionens stegsvar.

Resultatet av identifieringen visas i Figur 5.1. Den övre av dessa kurvor är insignalen 211KA101 medan den undre av kurvorna i figuren är utsignalen 597KA767. Samtidigt visas en röd kurva som är modellens utsignal när modellen har 211KA101 som insignal. Överensstämmelsen mellan den blå och den röda kurvan är mycket god. Detta betyder att den identifierade modellen är en bra beskrivning av ånglednings-resonansfiltret. Stegsvartest av modellen visas i Figur 5.2. Kurvan betecknas med "identification" i figuren.

I Figuren 5.2 visas också resultat av en stegsvartest av den teoretiska överföringsfunktionen $G(s)$. Den benämns med "simulation" i figuren. Som framgår av figuren är det mycket god överensstämmelse mellan "simulation" och "identification". Slutsatsen blir att mätdata från anläggningen bekräftar att ångledningsresonansfiltret har den föreskrivna dynamiken.

5.2 PI-regulatorn

PI-regulatorns överföringsfunktion har undersökts genom att nyttja dess insignal 597KA769 och dess utsignal som är skillnaden mellan 597KA771 och neutronflödessignalen 597KA770. Se Figur 2.1. PI-regulatorns överföringsfunktion $G(s) = K(1 + 1/(T_i s))$. Enligt uppgift är integrationstiden $T_i = 5$ s och förstärkningen $K = 5.98$.

Resultaten från processidentifieringen visar att $T_i = 4.6$ s och en förstärkning $K = 72.6$, se Figur 5.3. Integrationstiden 4.6 s stämmer förhållandevis bra med det förväntade värdet 5 s medan den beräknade förstärkningen avviker. Bedömningen är att avvikelsen i förstärkning beror på skillnaden i signalenhet. De data som nyttjats i processidentifieringen har givits oss i fysikalisk enhet och fördenskull är resultaten i fysikalisk enhet. Detta kan vara orsaken till avvikelsen. Det bör också sägas att en skillnad i enhet inte har någon påverkan på beräkningen av tidskonstanter och integrationstider.

5.3 Neutronframkopplingsfiltret

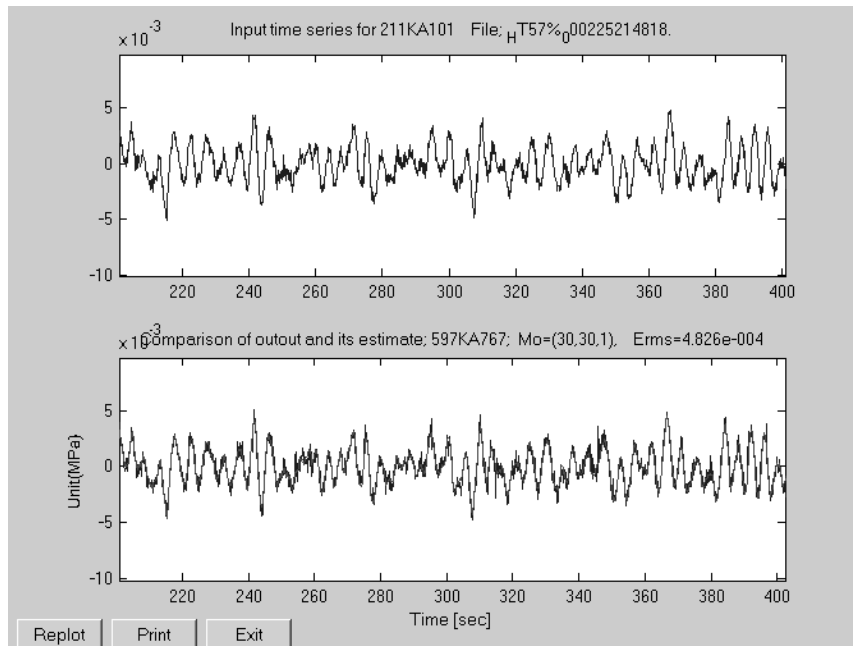
APRM-signalen 531KA077 användes i detta fall som insignal och filtrets utsignal 597KA770 nyttjades som utsignal vid processidentifieringen, se Figur 2.1.

Överföringsfunktionen för filtret är enligt uppgift $G(s) = 1/(1 + 5 s)$.

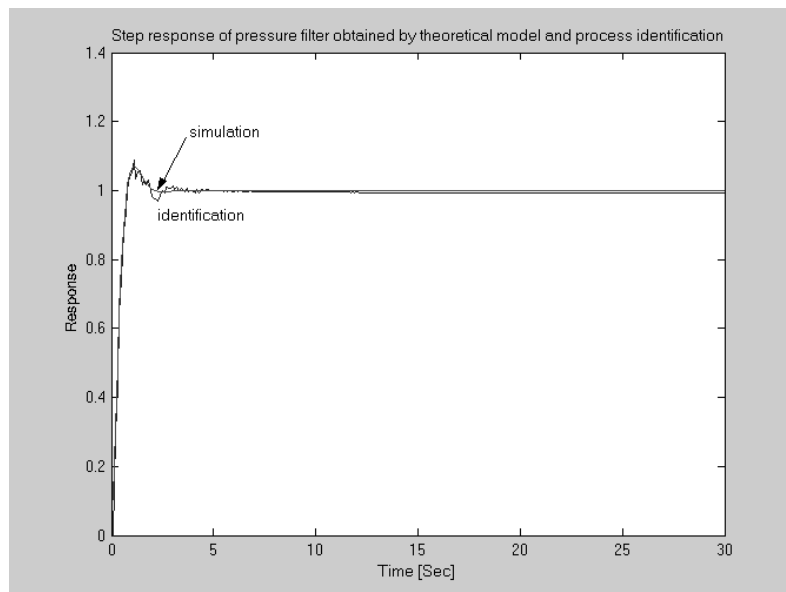
Stegsvarstest av den identifierade modellen av filtret visas tillsammans med det simulerade stegsvaret. Överensstämmelsen mellan ”identification” och ”simulation” är mycket god, se Figur 5.4. Detta innebär att mätsignalerna från Oskarshamn 3 bekräftar neutronframkopplingens parametrar.

5.4 EHW-dynamiken

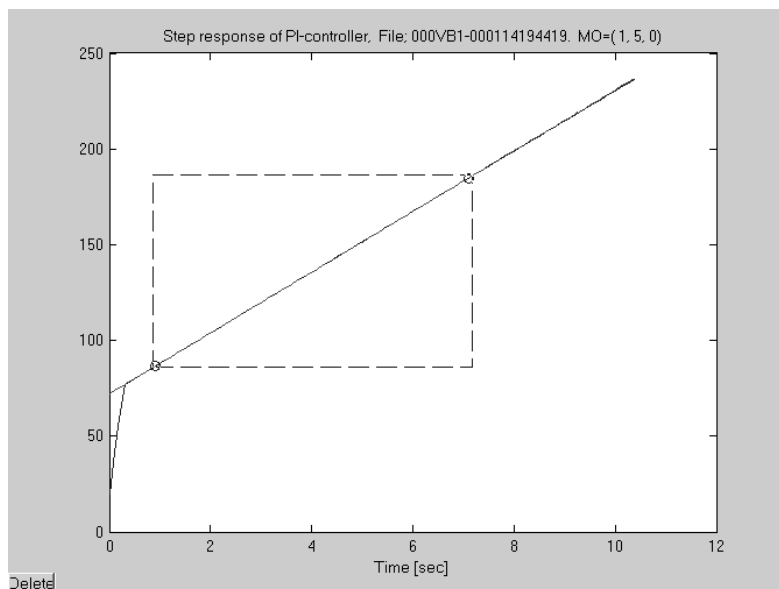
I detta kapitel nyttjas ångflödesbörvärdet 597KA772 som insignal och ventillägena 421VA1, 421VA2, 421VB1 och 421VB2 som utsignal. Resultat från identifieringen visas i Figur 5.5. Identifieringen visar att tidskonstanten ~ 0.7 s och förstärkningen ~ 1.0 för de fyra ventilerna.



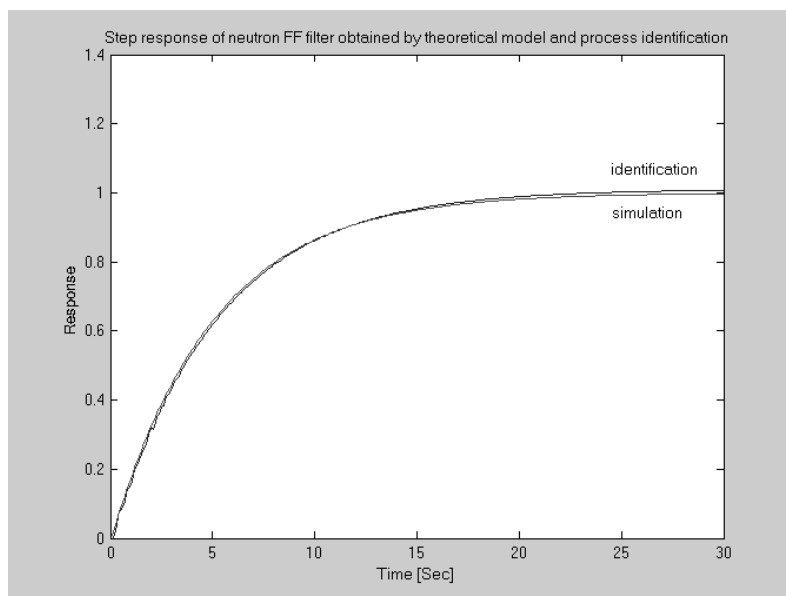
Figur 5.1 Identifiering av ångledningsresonansfiltret med 211KA101 som insignal och 597KA767 som utsignal. Det är mycket god överensstämmelse mellan den registrerade utsignalen och modellens utsignal.



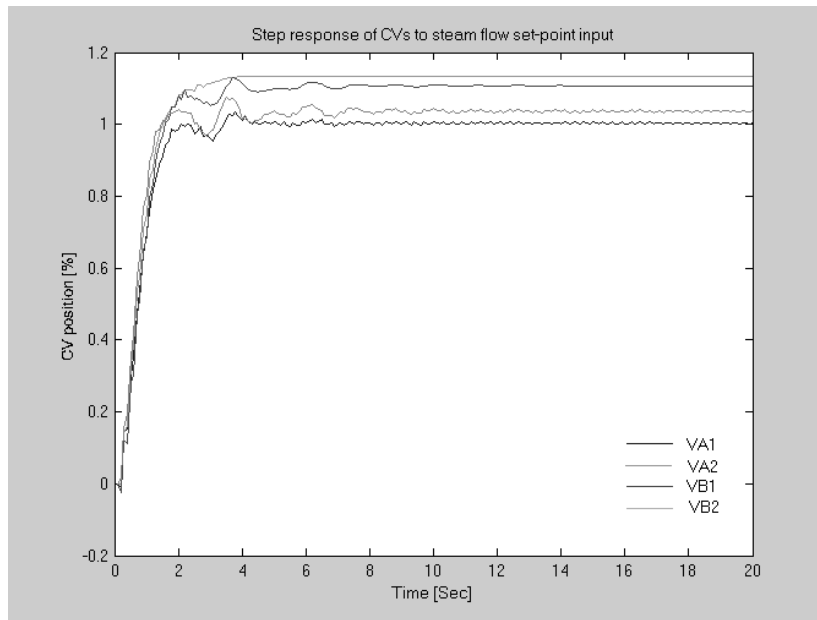
Figur 5.2 Stegvarsjämförelse för den identifierade modellen av ångledningsresonansfiltret och motsvarande resultat för simulerat stegsvar. Mycket god överensstämmelse.



Figur 5.3 Resultat med identifieringen av PI-regulatorn.



Figur 5.4 Identifiering av neutronframkopplingsfiltrets dynamik. Figuren visar stegsvarstest av den identifierade modellen samt stegsvarstest av en simulerad överföringsfunktion med angiven dynamik. Mycket god överensstämmelse.



Figur 5.5 Identifiering av överföringsfunktionen med ångflödesbörvärdet som insignal och ventilpositionen som utsignal. Tidskonstanten ~ 0.7 s och förstärkningen ~ 1.0 för de fyra ventilerna.

6 Förstärkningen hos överföringsfunktionerna i olika driftlägen

Undersökningen visar att stabiliteten i tryckregleringen förändras under ventilproven det vill säga vid drift med 3 ventiler. Den visar också att stabilitetsmålet DR_t ändras med reaktoreffekten. Detta förhållande måste innebära att loopförstärkningen i tryckreglersystemet förändras eller att fasvridningen hos överföringsfunktionerna förändras med driftläget. Av Ziegler-Nichols tumregel framgår det att ett reglersystem förväntas bli instabilt med oscillerade ärvärde om förstärkningen $K = K_o$ blir tillräckligt hög. Tumregeln avser regulatorns förstärkning. Men det som avgör stabiliteten är den totala loopförstärkningen. Resultatet, det vill säga svängningar, blir alltså detsamma om processens förstärkning ökar.

För att få klarhet i hur förstärkningen förändras i olika driftlägen skattas förstärkningarna för de olika överföringsfunktionerna som ingår i reglersystemet. I detta sammanhang nyttjas svängningen vid 0.2 Hz.

På grund av tydlig oscillation vid 0.2 Hz är det hög koherens mellan de flesta signalerna vid denna frekvens. Figur 6.1 visar resultat för koherensen mellan 211KA101 och 531KA077, där en tydlig resonans är synlig vid 0.2 Hz i amplitudkurvan i den övre kurvan i figuren. Den undre kurvan visar koherensens fasvinkel som funktion av frekvensen. De förstärkningsberäkningar som presenteras i detta avsnitt har utnyttjat 0.2 Hz svängningen. De ömsesidiga överföringsfunktionerna från insignal till utsignal har beräknats och sedan har förstärkningen vid 0.2 Hz från insignal till utsignal noterats som förstärkning för överföringsfunktionen i fråga. I den följande framställningen framgår resultaten från dessa beräkningar för de olika experimenten M1-M4. I princip är det den beräknade förstärkningen som funktion av ångventilläget som kommer att presenteras.

6.1 Förstärkningen med ångflödesbörvärdet som insignal och medel ventilläget som utsignal

Resultaten från de olika experimenten framgår av Figur 6.2. De blå symbolerna visar resultat med 3 ångventiler medan de röda symbolerna anger resultaten för drift med 4 ångventiler. Det är tydligt att förstärkningen ökar med ångventilläget. Det bör påpekas i detta fall att ångventilläget är medelvärdet för ångventillägena.

6.2 Förstärkningen med ventilpositionen som insignal och ångledningstrycket som utsignal

I Figur 6.3 visas de beräknade förstärkningarna för de olika experimenten för drift med såväl 3 som 4 ångventiler. De plottade linjerna i figuren visar att förstärkningen är avtagande för drift med 4 ventiler medan den är klart högre och växande vid drift med 3 ventiler.

Resultaten av förstärkningsberäkningen har också sammanställts i ett stapeldiagram i Figur 6.4. Också i denna figur framgår det att förstärkningen är väsentligt högre vid drift av 3 ångventiler än vid drift av 4. Dessutom framgår det att ventilen 421VB1 har tydligt högre förstärkning än de övriga vid drift med 4 ångventiler.

Av den tidigare analysen av stabiliteten framgår det att det är när ventilen 421VB1 stängs som den bästa stabilitetsmarginalen för tryckregleringen uppnås $DR_t \sim 0.5$. Det är intressant att se att ventilen 421VB1 som försämrar stabiliteten har högst förstärkning vid drift med 4 ångventiler. Se de blå staplarna i Figur 6.4.

6.3 Förstärkningen med ventilläge som insignal och reaktortryck som utsignal

Överföringsfunktionen med ångventilläget som insignal och reaktortrycket som utsignal har en dynamik som exemplifieras i Figur 6.5. Figuren visar ett stegsvar med den identifierade modellen. Stegsvaret ger en reduktion av reaktortrycket när ventilen öppnar. Detta är naturligt eftersom ångflödet ökar.

I Figur 6.6 presenteras förstärkningen för överföringsfunktionen för de olika experimenten. Röd linje motsvarar drift med 4 ångventiler medan blå linje motsvarar drift med tre ångventiler. Det är tydligt att förstärkningen avtar med ökande ångventilöppning vid drift med 4 ventiler. Medan förstärkningen ökar med ökande ventilöppning vid drift med 3 ventiler.

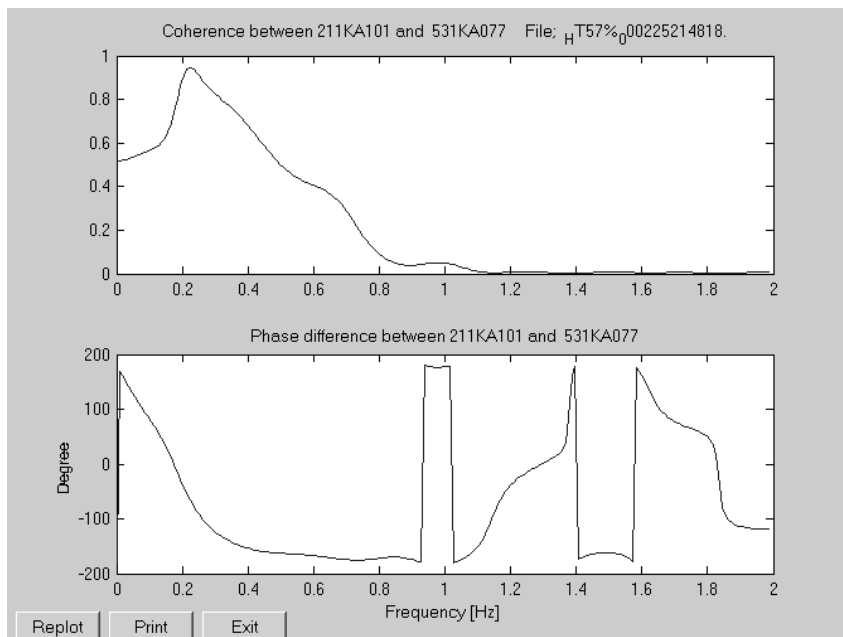
6.4 Förstärkningen med ångflödesbörvärdet som insignal och reaktortrycket som utsignal

Resultatet från beräkningen av den totala förstärkningen med ångflödesbörvärdet som insignal och reaktortrycket som utsignal framgår av Figur 6.7. Den röda linjen visar förstärkningen vid drift med 4 ångventiler medan den blå avser experimenten med 3 ångventiler.

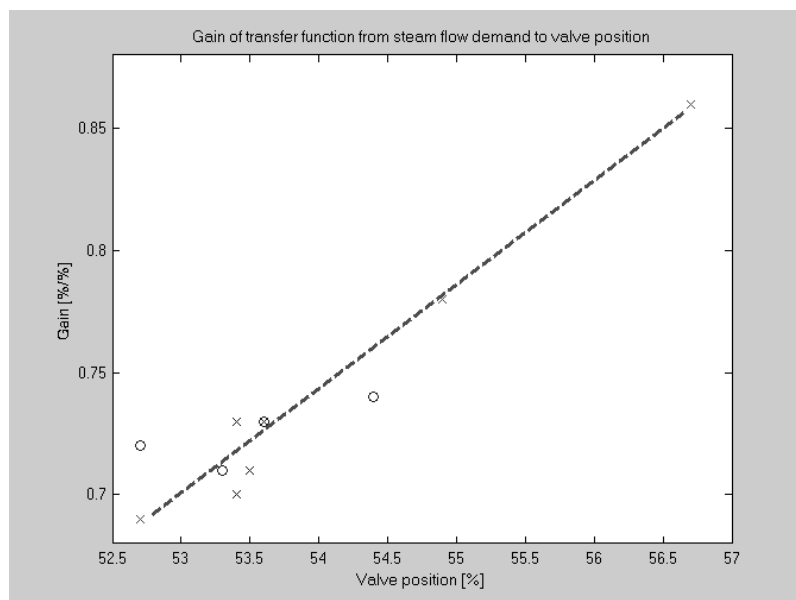
Vid drift med 4 ångventiler är tydligen förstärkningen för den totala överföringsfunktionen konstant oberoende av ventilläget, se Figur 6.7. Detta förklarar varför reglersystemets egenskaper inte uppträder med oväntade oscillationer vid drift med 4 ångventiler.

Figur 6.7 visar också att förstärkningen för den totala överföringsfunktionen är större och växande med ventilläget vid drift med 3 ångventiler. Den ökade totala förstärkningen försämrar stabiliteten. Och detta förklarar varför DR_t för trycksignalen ökar vid drift med 3 ångventiler istället för drift med 4. Att den totala förstärkningen dessutom ökar med ökande ventilöppning förklarar varför drift med 3 ventiler ger en ökning i DR_t för trycksignalen när ventilöppningen ökar från 52 % till 55 %.

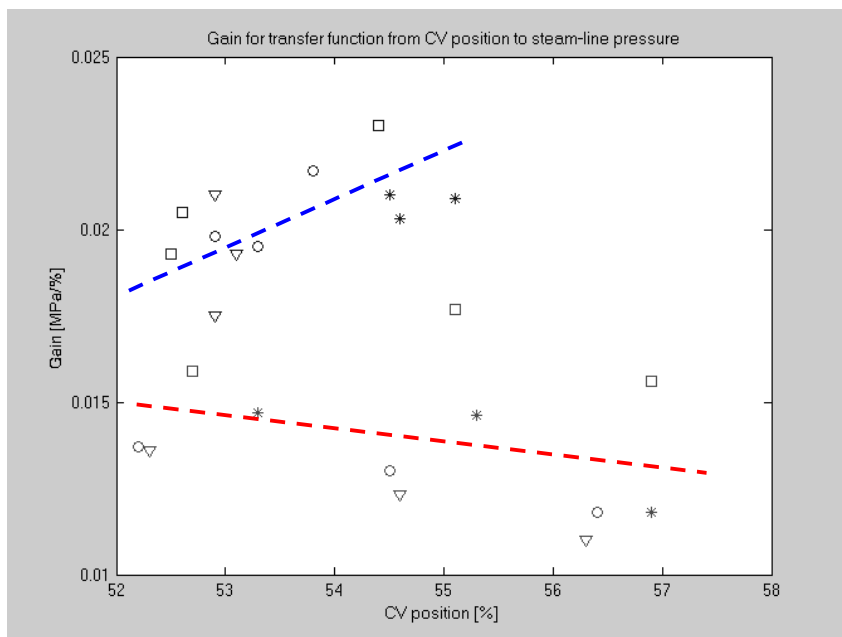
Tryckregulatorns design tycks vara sådan att den är avpassad för drift med 4 ångventiler. Detta ger en total förstärkning i det återkopplade reglersystemet som är konstant oberoende av driftläget.



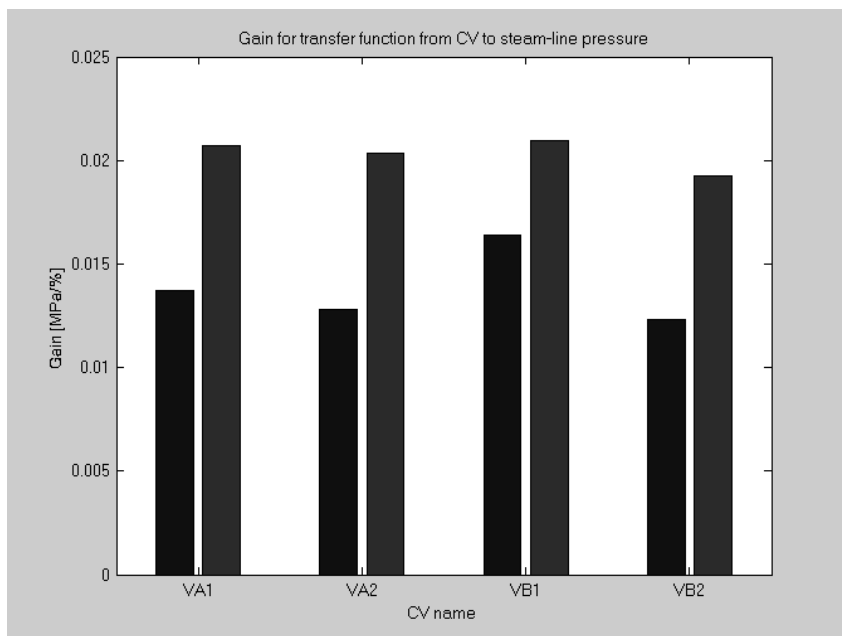
Figur 6.1 Koherensen mellan reaktortryck (211KA101) och APRM (531KA077) som funktion av frekvensen. Amplitudkurvan, den övre, visar en tydlig topp vid 0.2 Hz.



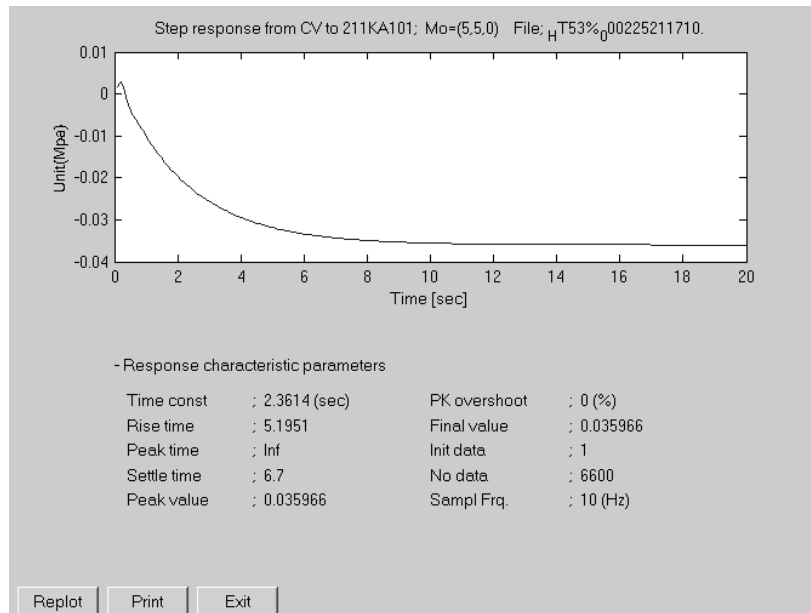
Figur 6.2 Förstärkningen för överföringsfunktionen med ångflödesbörvärdet som insignal och ventilpositionen som utsignal under experimenten vid olika ventilöppningar. Röd koordinat anger prov med 4 ventiler medan blå koordinat anger prov med 3 ventiler. Förstärkningen ökar med ökande ventilöppning.



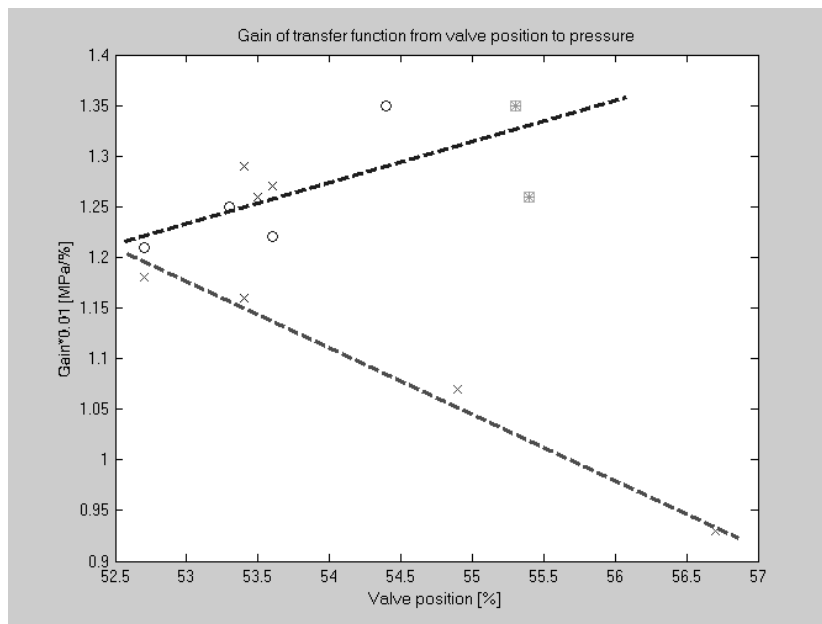
Figur 6.3 Förstärkningen för överföringsfunktionen med ventilläge som insignal och ångledningstryck som utsignal för varje ångventil. Röd symbol för drift med 4 ångventiler och blå symbol för drift med 3 ångventiler.



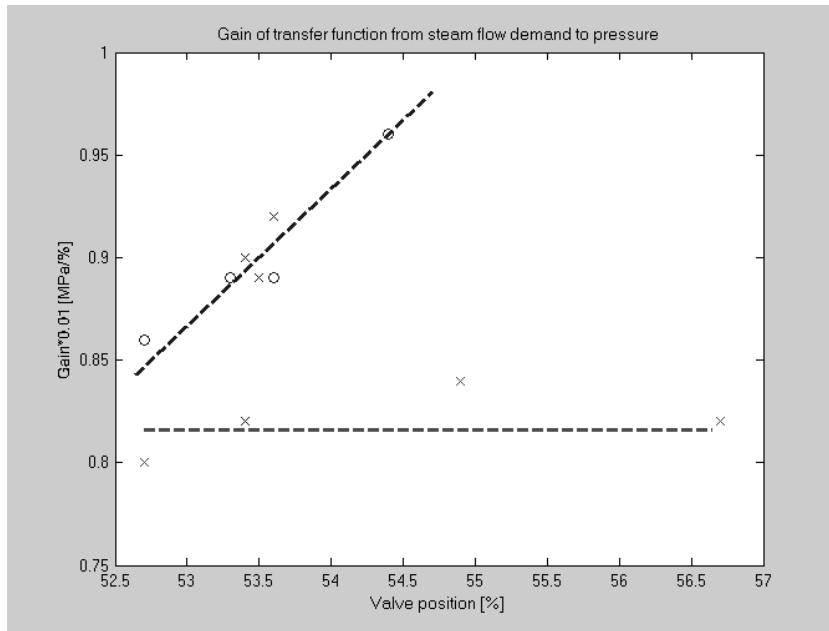
Figur 6.4 Jämförelse av beräknad förstärkning för överföringsfunktionen med ventilläge som insignal och ångledningstryck som utsignal. Blå stapel för drift med 4 ångventiler och brun stapel för drift med 3 ångventiler.



Figur 6.5 Stegsvartest av den identifierade modellen med ventilläge som insignal och reaktortryck som utsignal.



Figur 6.6 Förstärkningen för överföringsfunktionen med ventilläge som insignal och reaktortryck som funktion av ångventilläget. Röd symbol för drift med 4 ångventiler och blå symbol för drift med 3 ångventiler.



Figur 6.7 Förstärkningen för den totala överföringsfunktionen med ångflödesbörvärdet som insignal och reaktortrycket som utsignal som funktion av ångventilläget. Röd symbol för drift med 4 ångventiler och blå symbol för drift med 3 ångventiler.

7 Regulatorns parametrar –förslag till åtgärd

Föregående kapitel visar att den process som tryckregulatorn styr har en konstant förstärkning vid drift med 4 ångventiler oberoende av driftläget. Detta gäller inte vid drift med 3 ångventiler. I samband med beräkningarna framkom också att tryckreglersystemet har ett DR_t som varierar mellan 0.5 – 0.97 vid ventilprovning.

Tryckregulatorns parametrar och dess möjlighet till inställning har diskuterats i Kapitel 3. De värden som nyttjas är förstärkningen $P = 5.98$ och integrationstiden $T_i = 5$ s.

Enligt Ziegler-Nichols koncept för inställningen av regulatorns parametrar bör periodtiden T_o beaktas när regulatorn enbart har P-funktion och förstärkningen har ökats så att trycket oscillerar. I mätdata med högamplitudsvängningen är periodtiden $T_o = 4$ s. Detta resultat gäller för tryckregulatorn med PI-funktion i Oskarshamn 3. Under antagandet att T_o erhållits med enbart proportionell reglering så skulle den rekommenderade integrationstiden $T_i = 0.85 T_o = 3.4$ s. Den integrationstid som gäller vid Oskarshamn 3 är 5 s. Den är således helt rimlig enligt Ziegler-Nichols tumregel.

När det gäller förstärkningen P så är den alltför hög för drift med 3 ångventiler eftersom det uppstår svängningar. Ett sätt är då att minska regulatorns förstärkning. Detta skulle ha det goda med sig att DR_t för trycksignalen som idag är omkring 0.5 vid drift av 4 ångventiler skulle minska och ge större stabilitetsmarginal. Exempelvis $DR_t = 0.2-0.3$, för att klara den försämring i stabilitet som uppstår vid drift med 3 ångventiler.

Bodediagrammet för tryckreglersystemet i Oskarshamn 3 presenteras i Figur 7.1. Den övre kurvan visar förstärkningen för samtliga kaskadkopplade överföringsfunktioner som funktion av frekvensen. Medan den undre kurvan visar motsvarande faskurva som funktion av frekvensen.

Av Figur 7.1 framgår det att förstärkningen = 1 vid 0.25 Hz. Och detta sker vid en fasvridning av cirka 160 grader. Detta innebär en fasmarginal med 20 grader. Figur 7.1 visar också att en höjning av förstärkningen leder till en ytterligare minskning i fasmarginal och en samtidig ökning i svängningsfrekvens. Det omvända gäller naturligtvis också. En sänkning av förstärkningen leder till större fasmarginal och därmed stabilare beteende.

Det bör dock sägas att Bodediagrammet har viss osäkerhet eftersom det sammansätts av flera överföringsfunktioner i kaskad efter varandra. Den totala förstärknings- och faskurvan kan därför vara behäftade med viss osäkerhet. Värdet av det principiella resonemanget kvarstår dock.

7.1 Jämförelse med annan reaktor

I Figur 7.2 visas APSD för trycksignalen i Oskarshamn 3. Figuren visar en mycket tydlig topp vid 0.2 Hz. Det är denna topp i spektrum som ger det förhöjda $DR_t = 0.5$ vid normaldrift med 4 ångventiler.

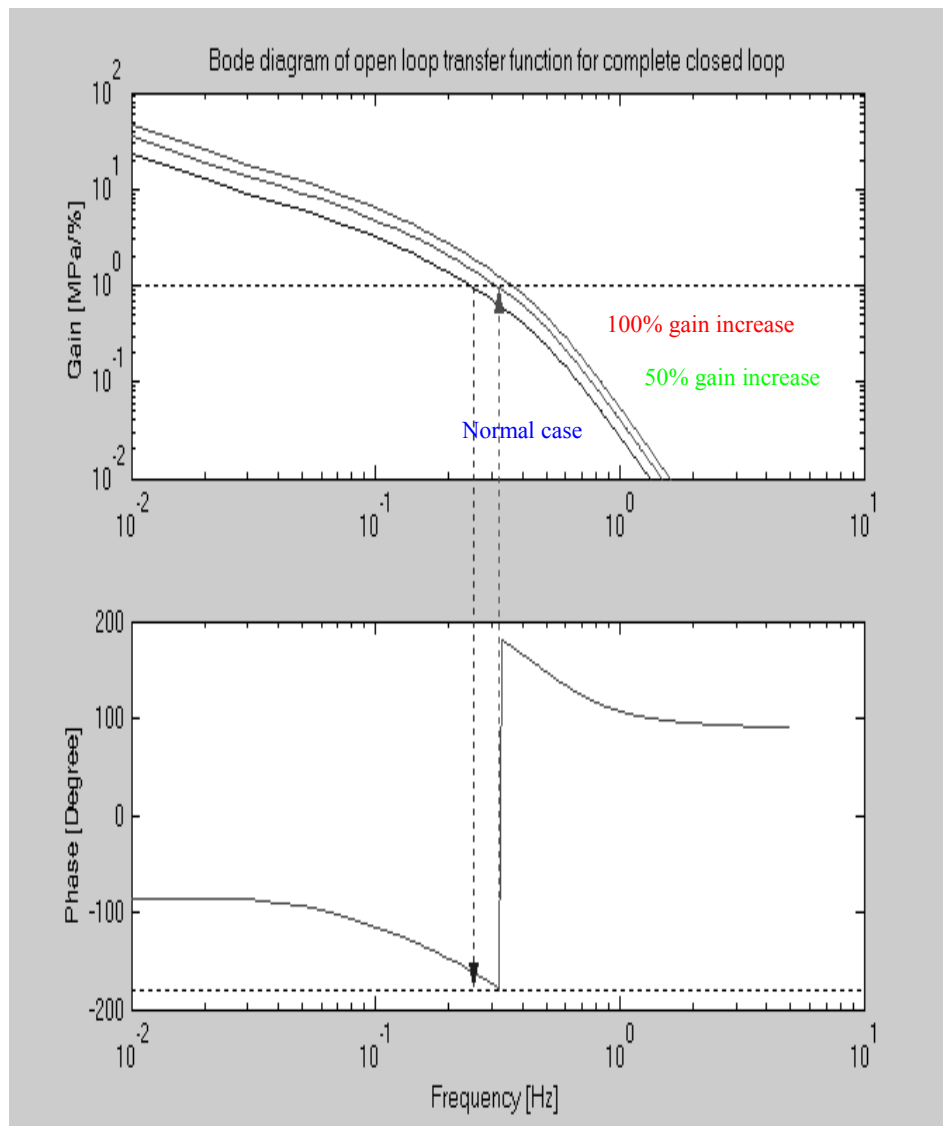
I Figur 7.3 visas motsvarande APSD för trycksignalen från en annan reaktor. Här syns inte någon resonansstopp mellan 0.1 och 1 Hz. Beräknat DR_t -värde är därför också mycket lågt $DR_t \sim 0.1$.

Tryckregleringens dynamik vid Oskarshamn 3 avviker från det som kan förväntas även under normaldrift, det vill säga vid drift med 4 ångventiler.

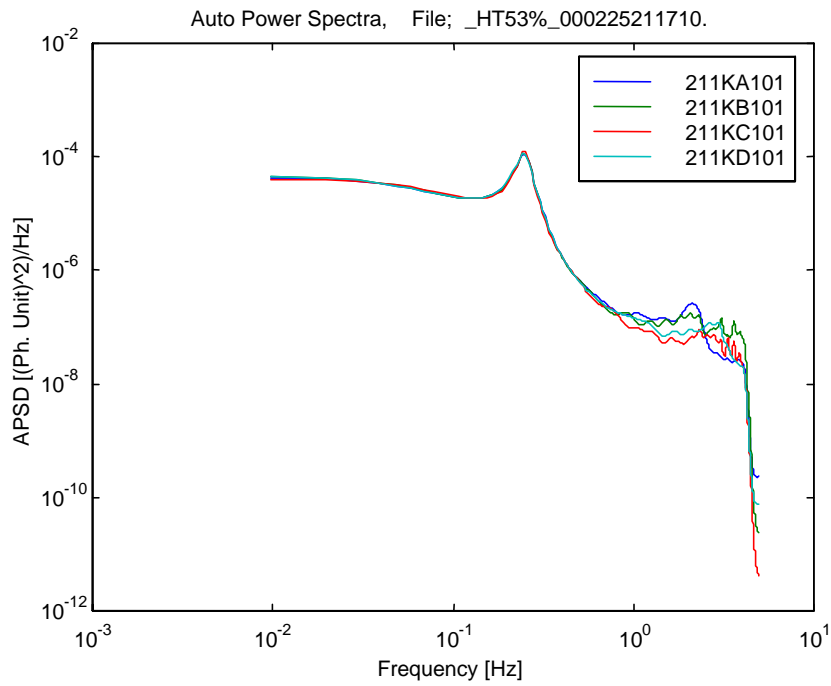
7.2 Stegsvartstest experimenten med regulatorn

Under november 1999 genomfördes stegsvartstester med tryckregulatorn. Dessa experiment redovisas inte här. En observation görs dock och det är att trycksignalerna från dessa experiment inte uppvisar den tydliga resonans vid 0.2 Hz som syns i de andra experimenten.

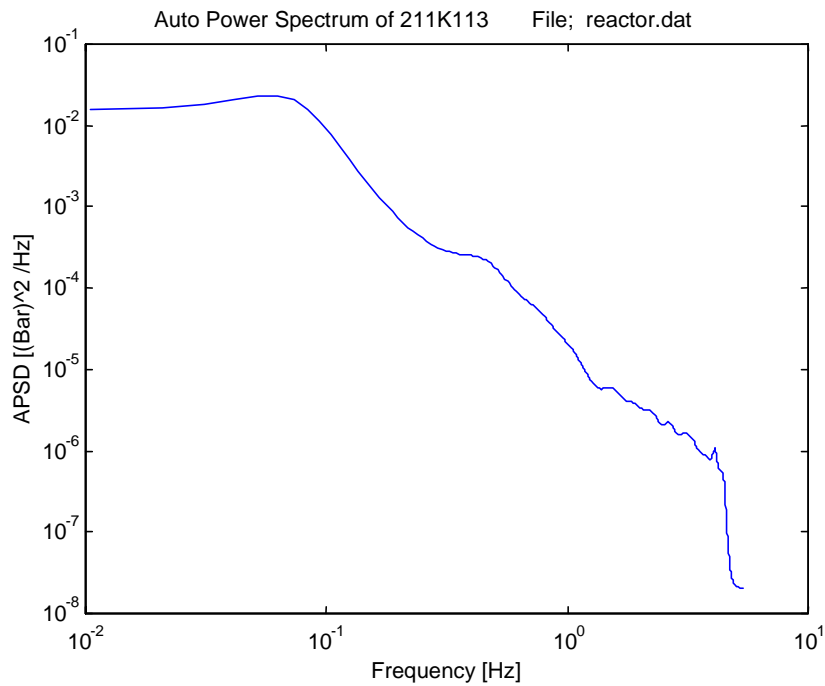
I Figur 7.4 visas APSD för trycksignalerna från drift med 4 ångventiler vid 85 % effekt, se experiment M1. Här syns resonansen tydligt vid 0.2 Hz. I Figur 7.5 visas APSD för trycksignalerna i samband med stegstörning av reaktorbörvärdet. Orsaken till att resonansen uteblir i samband med stegstörningsexperimenten är ej känd.



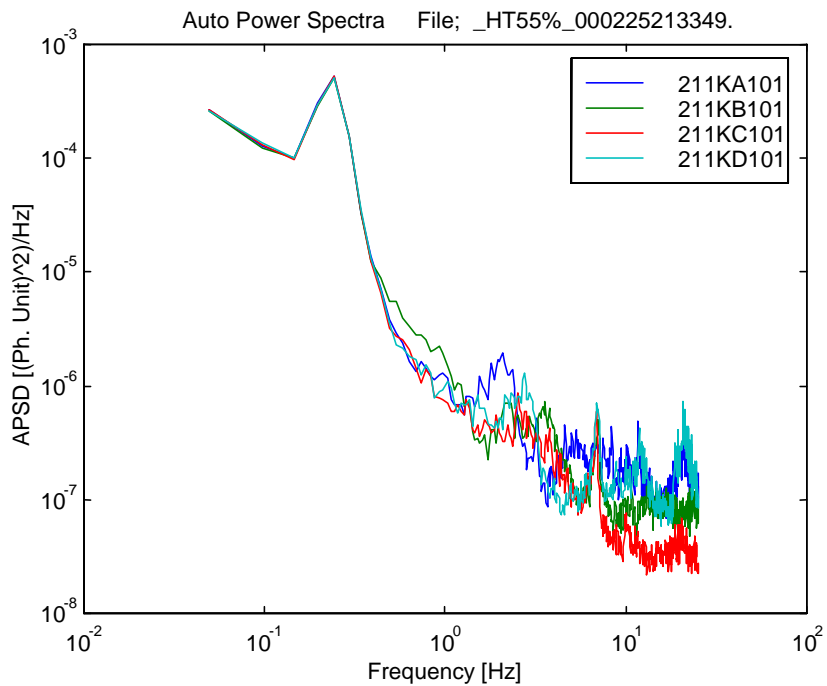
Figur 7.1 Bode diagram för tryckåterkopplinen med tillhörande process. Den gröna och den röda kurvan visar vad som händer när förstärkningen hos regulatören ökar med 50 respektive 100 %. Förstärkningen = 1 uppnås vid 0.25 Hz. Vid denna frekvens är fasmarginalen som synes mycket liten.



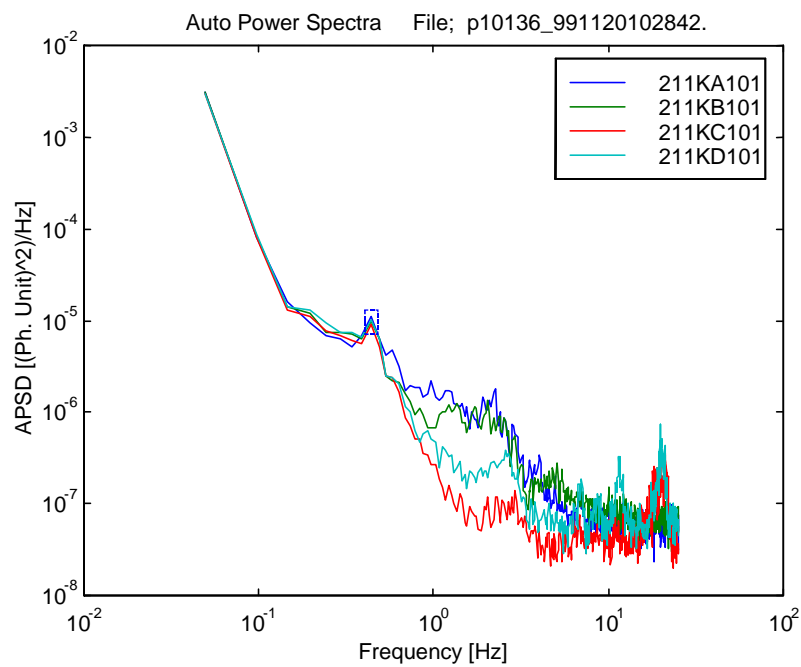
Figur 7.2 APSD för reaktortrycksignalerna 211KA101... vid drift med 4 ångventiler. Observera resonansen vid 0.2 Hz. Det är denna resonans som leder till $DR_t \sim 0.5$ för trycksignalen.



Figur 7.3 APSD för reaktortrycksignalen vid normaldrift. Någon resonans är ej synlig mellan 0.1 och 1 Hz. $DR_t \sim 0.1$ för trycksignalen. Data från annan reaktor.



Figur 7.4 APSD för trycksignalerna 211KX101 med 4 ångventiler vid 85 % effekt. Observera den tydliga resonansen vid 0.2 Hz.



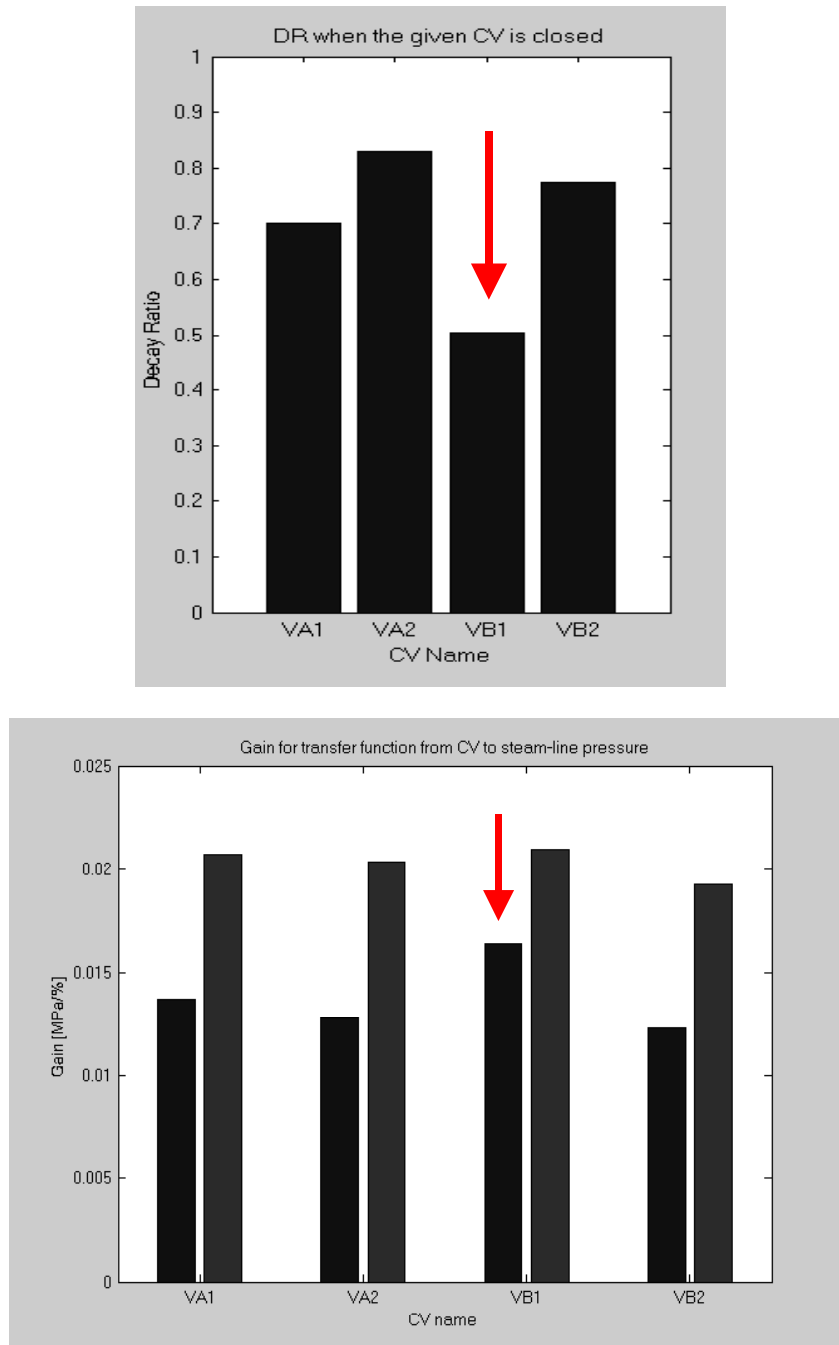
Figur 7.5 APSD för trycksignalerna från stegsvarstest av tryckregulatorn. Observera att resonansen vid 0.2 Hz ej är synlig.

8 Ångventil 421VB1 – förslag till åtgärd

Undersökningen visar att förstärkningen för överföringsfunktionen med ventilläget som insignal och ångledningstrycket som utsignal visar en tydlig ökning för ventilen 421VB1 vid drift med 4 ångventiler. Noterad med en pil i det nedre stapeldiagrammet i Figur 8.1. Detta leder till att denna ventil reducerar stabiliteten när alla 4 ångventilerna är i drift. Hur stor ökningen i DR_t är kan vi dock inte kvantifiera.

Den övre figuren visar DR_t vid stängning av de olika ventilerna. Lägst $DR_t = 0.5$ (bäst stabilitet) noteras när 421VB1 stängs.

Båda dessa resultat indikerar att ångventilen 421VB1 bidrar till att försämra stabiliteten. DR_t -stapeldiagrammet indikerar dessutom att om 421VB1 hade samma dynamik som de övriga 3 ventilerna så skulle troligen inte den bristande stabiliteten uppstå vid ventilprovning. Det är därför naturligt att föreslå en översyn av ventilen 421VB1 med tillhörande servosystem.



Figur 8.1 Förstärkningen i överföringsfunktionen med ventilläget som insignal och ångledningstrycket som utsignal visar en tydlig ökning för ventilen 421VB1. Noterad med en pil i den nedre figuren. Detta leder till att denna ventil försämrar stabiliteten vid drift med 4 ventiler. Den övre figuren visar DR_t vid stängning av de olika ventilerna. Lägst $DR_t = 0.5$ (bäst stabilitet) noteras när 421VB1 stängs.

9 Ventilprovning vid KSU

Som ett led i föreliggande undersökning har experiment genomförts vid KSU i Studsvik. Ett antal prov har genomförts med F3/O3 simulatoren för att studera hur dynamiken påverkas i samband med ventilprovning. F3/O3 simulatoren har ursprungligen levererats av GSE Power Systems Inc i USA. Tryckregulatorn som ingår i simulatoren är en mjukvarumässig kopia till den regulator som finns i Oskarshamn 3. Detta gäller såväl funktioner som parametrar.

Tre olika driftlägen har etablerats vid vilka proven har utförts. Eftersom simulatoren saknar eget brus har stabiliteten testats genom att införa en stegstörning till tryckregulatorns börvärde.

Syftet med stabilitetsundersökningen vid KSU var att för det första bekräfta stabilitetsförändringarna som observeras i anläggningen. Och för det andra se vilken/vilka parametrar i regulatorn eller processen som har betydande påverkan på reglerprestanda.

För varje etablerat driftläge har börvärdet ändrats från 6.9 till 6.94 MPa. Och med hjälp av det stegsvar som följer har DR_t beräknats som ett mått på stabiliteten. De enskilda stegsvaren visas i Figur 9.1-9.6 och utvärderingen av stegsvaren framgår av Tabell 9.1.

Tabell 9.1 Resultat från experimenten med ventilprovning med F3/O3 simulatoren vid KSU.

File	GSE1a	GSE1b	GSE2a	GSE2b	GSE3a	GSE3b
APRM/ HC	70/ 6200	70.5/ 6230	75.5/ 6930	75.7/ 6950	80.5/ 7610	80/ 7550
DR_t	0.32	0.76	0.26	0.23	0.25	0.19
Antal Ångventiler	4	3	4	3	4	3

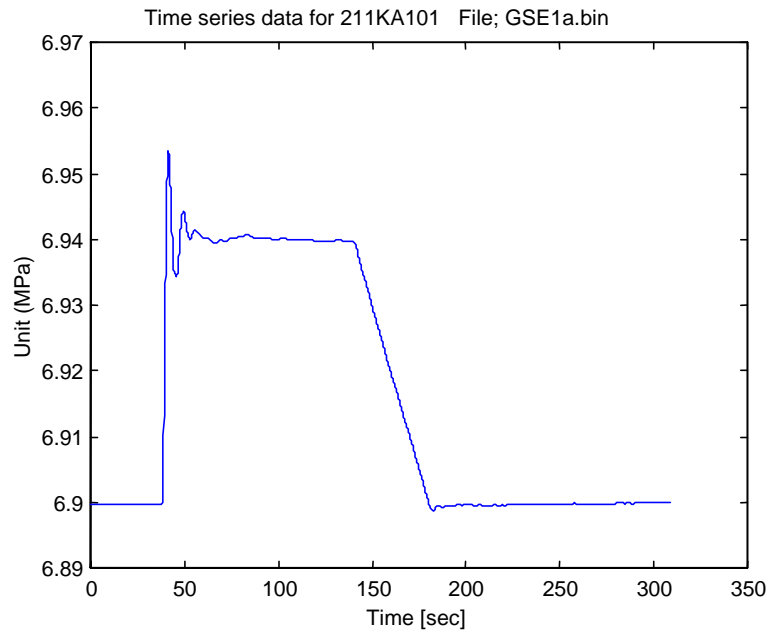
Resultaten avviker från det som observeras i anläggningen. I anläggningen försämras stabiliteten (DR_t ökar) i samband med ventilprovning, det vill säga när driften sker med 3 ångventiler. Detta gäller enligt Tabell 9.1 enbart för det lägsta effektläget när APRM ~70 %. För de övriga effektlägena förbättras stabiliteten något vid drift med 3 ångventiler istället för med 4. DR_t förändras från 0.26 till 0.23 vid ventilprovning, se effektläget APRM ~75.5 % i Tabell 9.1. Och DR_t förändras från 0.25 till 0.19 vid ventilprovning, se effektläget APRM ~80 %.

Det som dessutom avviker är att stabiliteten förbättras med ökande APRM under ventilproven vid KSU. Detta resultat är motsatt det som observeras i anläggningen.

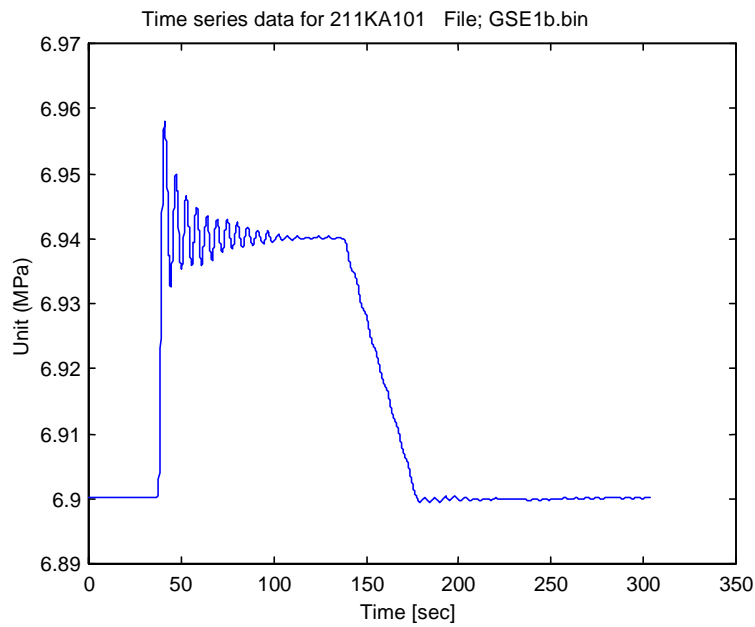
De skillnader som observeras mellan verket och simulatoren kan ha flera orsaker. Enligt KSU kan följande anledningar nämnas:

- Baffelplåtarna vid ångledningsstudsarna i reaktortanken är inte simulerade.

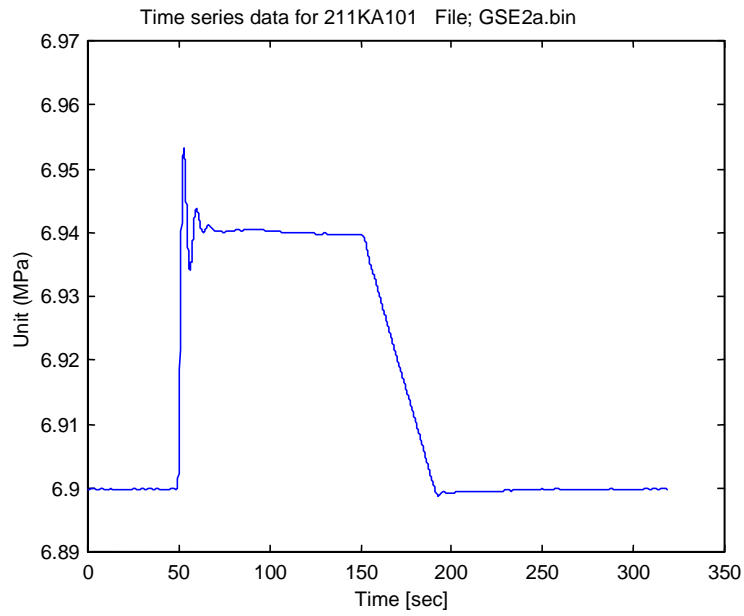
- I simulatören är dynamiken på nivå- och tryckreferenskärl inte så hårt kopplad som i verket.
- Tryckpåverkan vid stängning av en ångledning i simulatören har inte kontrollerats mot verket.



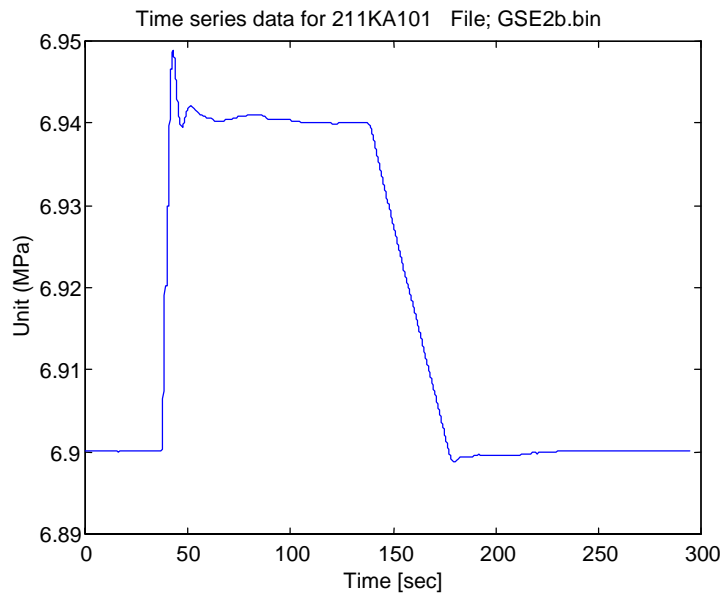
Figur 9.1 Test vid KSU. 4-ångventiler. APRM=70.5 %. HC=6200 kg/s. $DR_t = 0.32$.



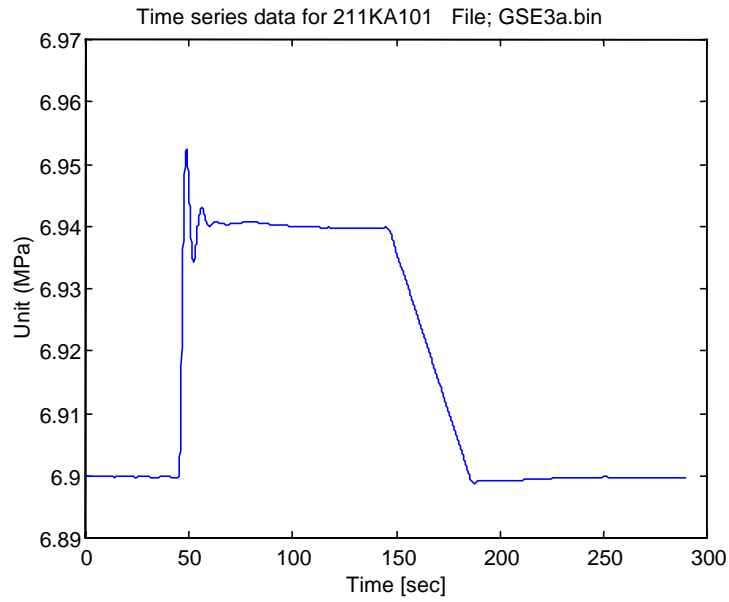
Figur 9.2 Test vid KSU. 3-ångventiler. APRM=70.5 %. HC=6230 kg/s. $DR_t = 0.76$.



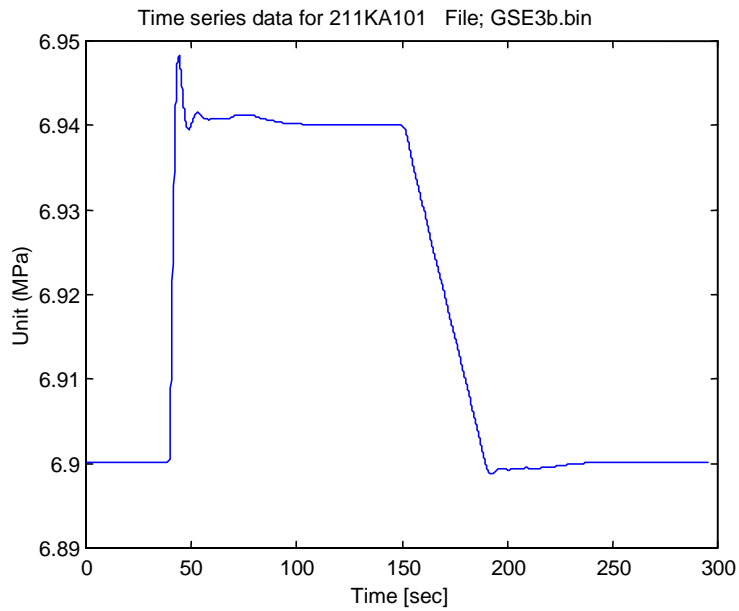
Figur 9.3 Test vid KSU. 4 ångventiler. APRM=75.5 %. HC=6930 kg/s. DR_t =0.26.



Figur 9.4 Test vid KSU. 3 ångventiler. APRM=75.5 %. HC=6950 kg/s. DR_t =0.23.



Figur 9.5 Test vid KSU. 4 ångledninggar. APRM=80.5 %. HC=7610 kg/s. $DR_t=0.25$.



Figur 9.6 Test vid KSU. 3 ångledninggar. APRM=80 %. HC=7550 kg/s. $DR_t=0.19$.

10 Slutsatser

Kort tid efter RA-99 konstaterades larm för hög dämpkvot $DR > 0.8$ med stabilitetsmonitorn SIMON vid Oskarshamn 3. Händelsen visade att neutronflödessvängningen som orsakade stabilitetslarm skedde vid 0.2 Hz till skillnad från den förväntade frekvensen 0.5 Hz. En närmare undersökning visade att det var reglersystemet för reaktortryck som gav de påtvingade svängningarna av reaktordynamiken vid 0.2 Hz. Händelsen inträffade i samband med de periodiska ventilprov som utförs i anläggningen. Provet utförs vid reducerad effekt genom att matarvattenflödet reduceras till (1200 kg/s) vilket motsvarar APRM $\sim 75\%$.

Föreliggande undersökning har genomförts på uppdrag av SKI. Den baseras på en omfattande mängd mätdata som samlats in i samband med periodiska ventilprov men också under normaldrift vid olika effekter.

Resultaten visar att DR_t (Decay Ratio för tryckregleringen) var ~ 0.5 vid drift med 4 ångventiler. Att DR_t varit konstant vid drift med 4 ångventiler bedöms bero på att förstärkningen i återkopplingsloopen varit konstant oberoende av driftläget. Undersökningen visar också att $DR_t = 0.5 - 0.97$ vid drift med 3 ångventiler, det vill säga under ventilprovningen. Att DR_t förändrats bedöms bero på att förstärkningen i återkopplingsloopen varit högre och dessutom ökat med effekten på reaktorn. Det högsta DR_t värdet ($DR_t = 0.97$) erhöles när ventilprovet genomfördes vid APRM = 77 %.

Resultaten visar också att bäst stabilitet ($DR_t = 0.5$) erhålls vid ventilproven när ångventilen 421VB1 stängs. Detta framgår av samtliga ventilstängningsexperiment. Tolkningen är att ventilen 421VB1 bidrar med förhöjd förstärkning. Detta gäller åtminstone vid drift med 4 ångventiler.

Undersökningen omfattade också överföringsfunktionerna i tryckregulatorn. Denna visade att god överensstämmelse rådde mellan förväntad dynamik och den som identifierats med signalanalys. Tryckregulatorns förstärkning avvek dock tydligt från det förväntade värdet. Detta bedömdes dock möjligen bero på avvikande enhet.

Experiment med ventilprovning och datainsamling har också genomförts vid KSU med F3/O3 simulatorm. Ventilprov genomfördes vid 70, 75 och 80 % APRM-effekt. Resultaten avviker från de som erhöles i anläggningen. Lägst $DR_t = 0.19$, det vill säga bäst stabilitet, erhöles vid den högsta effekten, vilket är motsatt det som var att vänta.

Sammanfattningsvis visade resultaten från Oskarshamn 3 två möjligheter till att förbättra stabiliteten i tryckregleringen. Det ena förslaget innebär en sänkning av förstärkningen hos tryckregulatorn. Detta förväntas leda till lägre DR_t än nuvarande 0.5 vid drift med 4 ångventiler. På så vis skulle större stabilitetsmarginal erhållas för att klara ventilproven. Den andra åtgärden gäller undersökning av ångventilen 421VB1 som avviker dynamiskt från de övriga.

11 Referenser

- 1 Bertil Thomas. Modern reglerteknik. Almqvist och Wiksell 1992.
- 2 K.J. Åström. Reglerteori. Almqvist och Wiksell. 1968.
- 3 Thomas Ericson KSU. Kommunikation under projektet. 2001

